

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**AJUSTE AUTOMÁTICO DE CONTROLADORES PI PARA  
PROCESSOS DE FLUXO**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**VINÍCIUS LEÔNIDAS CURCIO**

**FLORIANÓPOLIS, SETEMBRO DE 1995.**

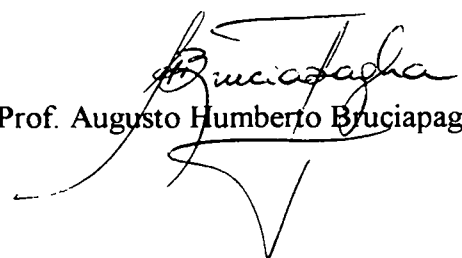
# AJUSTE AUTOMÁTICO DE CONTROLADORES PI PARA PROCESSOS DE FLUXO

**VINÍCIUS LEÔNIDAS CURCIO**

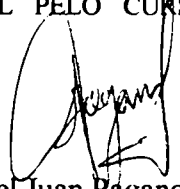
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

**MESTRE EM ENGENHARIA**

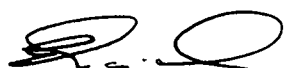
ESPECIALIDADE ENGENHARIA ELÉTRICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO SISTEMAS DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL, E APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO.



Prof. Augusto Humberto Bruciapaglia, Dr.Ing.  
Orientador

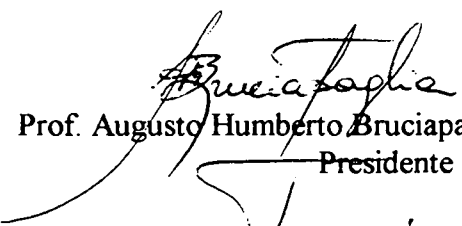


Prof. Daniel Juan Pagano, M.Sc.  
Co-orientador

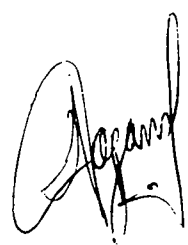


Prof. Enio Valmor Kassick, Dr.  
Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

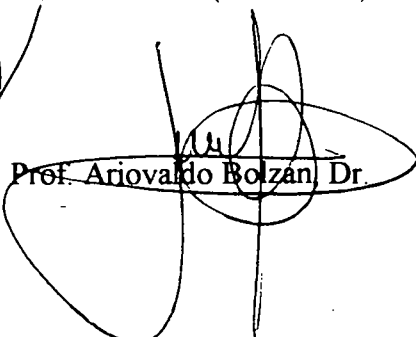
## **BANCA EXAMINADORA:**



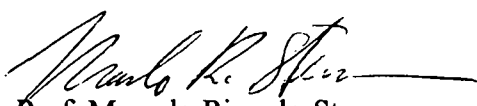
Prof. Augusto Humberto Bruciapaglia, Dr.Ing.  
Presidente (Orientador)



Prof. Daniel Juan Pagano, M.Sc.  
(Co-orientador)



Prof. Ariovaldo Bolzan, Dr.



Prof. Marcelo Ricardo Stemmer,  
Dr.Ing.

*"Mais vale lançar-se à luta, alcançar triunfo e glória, mesmo expondo-se ao insucesso, do que formar fila com pobres de espírito, que não amam muito nem sofrem muito, mas vivem nessa penumbra cinzenta sem conhecer vitória nem derrota."*

*Franklin D. Roosevelt*

A meus pais,  
a minhas irmãs Flavia e Beatriz  
e a Ana Beatriz.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao professor Augusto Humberto Bruciapaglia pela orientação.

Ao professor Daniel Juan Pagano pela co-orientação e incentivo.

Aos professores e funcionários da Pós-graduação em Engenharia Elétrica da UFSC.

A todos os colegas da pós-graduação, em especial à turma da UFRGS: Arão Fischman, Romeu Reginatto, Alexandre Sanfelice Bazanella e Tristão Júlio Garcia dos Santos.

Ao CAPES, ao CNPq e às empresas RIOCELL e RIOSOFT, pelo apoio financeiro.

Aos operadores de planta, pela compreensão durante os ensaios de campo.

# SUMÁRIO

<b>RESUMO</b>	<b>XIII</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>XIV</b>
<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 2 - CARACTERÍSTICAS DOS PROCESSOS DE FLUXO</b>	<b>11</b>
2.1 Introdução.....	11
2.2 Dinâmica de um Fluido em Movimento .....	12
2.2.1 Fluidos Incompressíveis .....	13
2.2.2 Fluidos Compressíveis .....	18
2.3 Válvulas Pneumáticas.....	20
2.3.1 Princípio Básico de Funcionamento e Componentes Principais .....	20
2.3.2 Curvas de Abertura X Fluxo das Válvulas .....	22
2.3.3 Comportamento Dinâmico das Válvulas Pneumáticas .....	27
2.3.4 Zona Morta nas Válvulas .....	29
2.3.5 Limite de Velocidade .....	31
2.4 O Modelo das Malhas de Fluxo.....	31
2.5 Comparação do Modelo de Fluxo com Malhas Reais .....	34
2.6 Conclusão.....	36
<b>CAPÍTULO 3 - AJUSTE AUTOMÁTICO DE CONTROLADORES PI PARA PROCESSOS DE FLUXO</b>	<b>37</b>
3.1 Introdução.....	37
3.2 Desempenho em Malha Fechada para Processos de Fluxo.....	37
3.3 Metodologia para Obtenção do Ajuste Automático .....	42
3.4 O Caso da Relação $0 < L / \tau < 0,1$ .....	51
3.5 Avaliação em Simulações do Conjunto Identificação + Ajuste + Desempenho em Malha Fechada.....	53

<b>3.6 Conclusão.....</b>	<b>55</b>
<b>CAPÍTULO 4 - METODOLOGIA E EQUIPAMENTOS DE TESTE</b>	<b>57</b>
<b>4.1 Introdução.....</b>	<b>57</b>
<b>4.2 Sistema de Controle Utilizado pela RIOCELL.....</b>	<b>57</b>
<b>4.3 O <i>Hardware</i>.....</b>	<b>60</b>
<b>4.4 O <i>Software</i>.....</b>	<b>64</b>
4.4.1 Aquisição e Controle.....	65
4.4.2 Implementação do Ajuste Automático .....	65
4.4.3 Interface Homem/Máquina.....	67
<b>4.5 Métodos de Reconhecimento de Malha Aberta .....</b>	<b>70</b>
4.5.1 Método de Reconhecimento de Smith.....	73
<b>4.6 Conclusão.....</b>	<b>74</b>
<b>CAPÍTULO 5 - AVALIAÇÃO DO AJUSTE AUTOMÁTICO PARA PROCESSOS DE FLUXO</b>	<b>76</b>
<b>5.1 Introdução.....</b>	<b>76</b>
<b>5.2 Avaliação numa Unidade Experimental de Fluxo.....</b>	<b>77</b>
5.2.1 Reconhecimento e Ajuste .....	78
5.2.2 Comportamento Perante Mudança de Referência.....	79
5.2.3 Rejeição de Perturbações.....	81
<b>5.3 Avaliação do Ajuste Automático em Processos Industriais.....</b>	<b>85</b>
5.3.1 Experimentos na Malha 451FICQ-046.....	86
5.3.2 Experimentos na Malha 451FIC-139.....	89
5.3.3 Experimentos na Malha 451FICA-172.....	92
5.3.4 Problemas Encontrados.....	97
<b>5.4 Conclusão.....</b>	<b>102</b>
<b>CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES</b>	<b>104</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>108</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>114</b>
<b>Anexo 1 - Equações Estáticas para Fluidos Compressíveis .....</b>	<b>115</b>

**Anexo 2 - Características das Malhas Industriais de Fluxo Utilizadas para Testes ..... 119**

**Anexo 3 - Diagrama com os SDCD da RIOCELL..... 126**

**Anexo 4 - Algoritmo PID Implementado..... 128**



# LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Projeto TAI: relações entre os parceiros.....	06
Figura 02 - Elementos normalmente encontrados em processos de fluxo.....	11
Figura 03 - Representação simplificada dos processos de fluxo.....	14
Figura 04 - Válvula pneumática.....	21
Figura 05 - Características inerentes das válvulas.....	24
Figura 06 - Característica instalada da válvula linear para $\Delta p_{\min} / \Delta p_{\max} = 0,1, 0,3$ e 1, com $R=50$ .....	25
Figura 07 - Característica instalada da válvula igual-porcentagem para $\Delta p_{\min} / \Delta p_{\max} = 0,1, 0,3$ e 1, com $R=50$ .....	26
Figura 08 - Característica de zona morta nas válvulas.....	30
Figura 09 - Diagrama de blocos da malha de fluxo: dinâmica da válvula pneumática mais a dinâmica do fluido.....	32
Figura 10 - Comparação da curva de um processo real (451FICA-172) com a curva obtida através de simulação do modelo do processo.....	35
Figura 11 - Comparação da curva de um processo real (451FICA-036) com a curva obtida através de simulação do modelo do processo.....	35
Figura 12 - Comparação entre as respostas de malha aberta e de malha fechada (451FIC-139).....	39
Figura 13 - Comparação entre as respostas de malha aberta e de malha fechada (451FICQ-046).....	40

Figura 14 - Especificações para os ajustes lento e rápido .....	41
Figura 15 - Sistema implementado no simulador .....	45
Figura 16 - Curvas de $K_c G \times L/\tau$ para o ajuste lento .....	49
Figura 17 - Curvas de $T_i/\tau \times L/\tau$ para o ajuste lento .....	49
Figura 18 - Curvas de $K_c G \times L/\tau$ para o ajuste rápido .....	50
Figura 19 - Curvas de $T_i/\tau \times L/\tau$ para o ajuste rápido .....	50
Figura 20 - Avaliação da influência da dinâmica do processo de 3ª ordem sobre o desempenho do ajuste automático (lento) .....	54
Figura 21 - Avaliação da influência da dinâmica do processo de 3ª ordem sobre o desempenho do ajuste automático (rápido) .....	55
Figura 22 - Sistema de comunicação com o SDCD via EXCOM .....	59
Figura 23 - Ligações dos equipamentos durante os ensaios de campo .....	63
Figura 24 - Estrutura do <i>software</i> implementado .....	66
Figura 25 - Tela apresentada pelo <i>software</i> .....	68
Figura 26 - Curva suavizada pelo método de regressões de 2ª ordem por intervalos .....	69
Figura 27 - Resposta ao degrau típica em processos industriais .....	72
Figura 28 - Método de identificação de Smith .....	74
Figura 29 - Processo de fluxo de laboratório .....	77
Figura 30 - Resposta ao degrau para realização do reconhecimento do processo .....	79
Figura 31 - Teste de referência do ajuste lento em laboratório .....	80
Figura 32 - Teste de referência do ajuste rápido em laboratório .....	81

Figura 33 - Teste de perturbação (suave) do ajuste lento em laboratório .....	83
Figura 34 - Teste de perturbação (suave) do ajuste rápido em laboratório.....	83
Figura 35 - Teste de perturbação (forte) do ajuste lento em laboratório .....	84
Figura 36 - Teste de perturbação (forte) do ajuste rápido em laboratório .....	84
Figura 37 - Teste com o controle via SDCCD em 451FICQ-046.....	87
Figura 38 - Ajuste lento em 451FICQ-046 (teste de referência) .....	88
Figura 39 - Ajuste rápido em 451FICQ-046 (teste de referência).....	89
Figura 40 - Teste com o controle via SDCCD em 451FIC-139.....	90
Figura 41 - Ajuste lento em 451FIC-139 (teste de referência).....	91
Figura 42 - Ajuste rápido em 451FIC-139 (teste de referência).....	91
Figura 43 - Teste com o controle via SDCCD em 451FICA-172.....	93
Figura 44 - Ajuste lento em 451FICA-172 (teste de referência) .....	94
Figura 45 - Ajuste rápido em 451FICA-172 (teste de referência) .....	94
Figura 46 - Ajuste lento em 451FICA-172 (teste de perturbação).....	96
Figura 47 - Ajuste rápido em 451FICA-172 ( teste de perturbação).....	96
Figura 48 - Oscilação no processo 451PIC-018 .....	98
Figura 49 - Ajuste lento no processo 451FICA-036 (com oscilação).....	100
Figura 50 - Ajuste rápido no processo 451FICA-036 (com oscilação) .....	100
Figura 51 - Testes na válvula da malha 451FICA-036.....	101
Figura 52 - Controle via SDCCD em 451 FICA-036 (oscilatório) .....	101

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Levantamento sobre os tipos de controle introduzidos nas indústrias japonesas ..... 02

Tabela 2 - Levantamento dos tipos de malhas nas plantas química e de cloro-soda da  
RIOCELL ..... 08

Tabela 3 - Levantamento dos controladores nas plantas química e de cloro-soda da  
RIOCELL ..... 09

Tabela 4 - Levantamento dos modos de controle nas plantas química e de cloro-soda da  
RIOCELL ..... 09

Tabela 5 - Comparação entre os parâmetros exatos e os parâmetros obtidos pelas fórmulas  
de ajuste para  $L=0$  ..... 52

## RESUMO

Este é um trabalho de caráter teórico-prático que está inserido em um projeto mais amplo, cujo objetivo é desenvolver algoritmos adaptativos dedicados para vários tipos de processos industriais. Dentro desse escopo, abordam-se neste trabalho os processos industriais de fluxo.

Desse modo, a partir de um estudo sobre o comportamento desses processos e de observações sobre o desempenho em malha fechada, em condições reais, chega-se a um ajuste automático de controladores PI dedicado para processos de fluxo, que atende a determinadas especificações de desempenho.

Para validar o ajuste automático, apresentam-se resultados obtidos sobre um processo de laboratório e sobre vários processos industriais. Também aborda-se um problema que ocorre com relativa frequência em malhas de controle e que tem origem na válvula reguladora, tendo sido constatado quando da realização de testes em ambiente industrial.

## **ABSTRACT**

This work is related to a broader project which aims to develop adaptive control techniques, designed specifically for common industrial processes. In this context, this work deals with the case of industrial flow processes.

Starting from a study of this kind of process and from practical observations of the closed loop performance, an automatic tuning for PI controllers, in flow loops, is obtained, expecting to get a stipulated closed loop performance.

Experimental trials were conducted on a laboratory process and on some industrial processes in order to validate the automatic tuning. A common nonlinear problem caused by friction in control valves is also described, since it was verified during the industrial experiments.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

Os processos existentes em indústrias químicas, petroquímicas, de alimentos, de papel e celulose e refinarias, entre muitas outras, constituem um campo vasto para aplicações de técnicas de controle automático. Nos primórdios da história do controle de processos, antes dos anos 40, segundo Luyben (1990, p. 6), a maioria das plantas industriais eram operadas essencialmente em modo manual, o que exigia a utilização de muitos operadores e de grandes tanques (denominados de “pulmões”) entre as unidades de produção pertencentes a mesma planta, que serviam como filtros às perturbações dinâmicas, evitando a propagação das mesmas através das unidades. Nos dias de hoje, em razão da extensão, da complexidade e da interação entre os processos, passando também pelas exigências de qualidade dos produtos e de redução de custos de produção, é essencial à operação dos processos a utilização de controle automático.

Para realizar controle realimentado nas indústrias, o algoritmo mais utilizado é o PID (Proporcional+Integral+Derivativo), ou simplificações do mesmo (P e PI). Esses controladores tornaram-se disponíveis comercialmente na década de 30, e já nos anos 40 estavam sendo utilizados na indústria com grande aceitação (Seborg, Edgar & Mellichamp, 1989, p. 184). Passaram, ao longo desses anos, por diferentes formas de implementações, acompanhando a evolução tecnológica, desde as implementações pneumáticas, depois eletrônicas (com transistores e circuitos analógicos integrados) e finalmente implementações digitais com microprocessadores (Aström & Hägglund, 1988, p. 1).

Desde a introdução dos primeiros controladores PID, ocorreu e vem ocorrendo um grande avanço na teoria de controle, com o conseqüente aparecimento de muitas técnicas mais elaboradas de controle realimentado do que os controladores PID. Além disto, há uma disponibilidade cada vez maior de meios para a implementação de controladores em sistemas digitais, cuja velocidade de processamento aumenta ano a ano, ao mesmo tempo em que o custo

de tais sistemas diminui. Apesar deste quadro, aparentemente propício para utilização de novas técnicas de controle, a realidade do dia a dia da indústria, revela que o uso de outro controle que não seja do tipo PID não chega a ser significativo. Tome-se como exemplo o trabalho de Nozaka, publicado em 1993, onde ele divulga os dados apresentados na Tabela 1, levantados pela JEMIMA (*Japan Electric Instruments Manufacturers' Association*), em 1990, sobre os tipos de controle que são utilizados nas indústrias japonesas, na qual observa-se uma proporção de quase 9 controladores PID para cada controlador de outro tipo (incluindo-se, neste último, caso as malhas em manual). Considerando-se que o Japão é um dos países mais industrializados e tecnologicamente desenvolvidos do mundo, pode-se concluir que se esse mesmo levantamento fosse feito mundialmente, a utilização de controle PID provavelmente apresentaria um valor percentual ainda mais elevado. Persson e Aström (1993), em outro trabalho apresentado no mesmo congresso<sup>1</sup>, afirmam que em aproximadamente 90% de todos os laços de controle utiliza-se controladores PID.

Tipo de controle	Quantidade de aplicações (%)
PID convencional	84,5
PID avançado <sup>2</sup>	6,8
Aplicações de Teoria de Controle Moderno <sup>3</sup>	1,5
Controle utilizando IA (Inteligência Artificial)	0,6
Controle Manual <sup>4</sup>	6,6

**Tabela 1 - Levantamento sobre os tipos de controle introduzidos nas indústrias japonesas.**

Esses dados não significam que os controladores PID são apropriados para desempenhar adequadamente todas as tarefas de controle automático nas indústrias, mas que as técnicas

---

<sup>1</sup> Apresentado no 12º Congresso Mundial da IFAC (*International Federation of Automatic Control*), realizado em Sydney, Austrália, em 1993.

<sup>2</sup> Compensação de atraso de transporte, planejamento de ganho, PID com ajuste automático, etc.

<sup>3</sup> Controle linear quadrático, observador de estados, filtro de Kalman, controle preditivo com modelo de referência, controle adaptativo, controle  $H_\infty$ , controle ótimo, outros.

<sup>4</sup> Confrontar com dados apresentados na Tabela 4.



recentes de controle ainda encontram dificuldades de ordem técnica e econômica para serem implementadas.

Numa outra pesquisa realizada em plantas de produção de papel e celulose no Canadá, observou-se que 80% das malhas de controle apresentavam oscilações. Dessas, 30% oscilavam em razão de algum problema na válvula de controle, 30% devido ao ajuste do controlador e 20% devido ao projeto do controlador e/ou do processo (Bialkowski, 1993). Portanto, está claro que a utilização de técnicas de ajuste automático de controladores PID, ou novas técnicas de controle, podem melhorar boa parte de problemas em malhas de controle nas indústrias.

Dos muitos fatores que podem explicar a preferência na utilização de controladores PID nas indústrias, destacam-se os seguintes (Aström & Hägglund, 1988, p. 1):

- é um controlador que utiliza realimentação da saída;
- pode eliminar o erro em regime permanente através da ação integral; possui ação de antecipação, através da parte derivativa e também pode lidar convenientemente com a saturação dos atuadores através da utilização de técnicas de *anti-windup*;
- são suficientes para resolver problemas de controle, quando os processos possuem dinâmica “benigna” e exigências de desempenho modestas, que é o caso da maioria dos processos industriais (p. 25);
- é familiar aos engenheiros e pessoal técnico, que já possuem práticas conhecidas para a instalação, ajuste e operação deste tipo de controlador.

A despeito da familiaridade citada anteriormente, segundo os autores supracitados, os controladores PID, em geral, não são bem ajustados, sendo que a ação derivativa é normalmente desativada pela simples razão que é difícil de ser ajustada (p. 2). Esse é um problema que pode ser facilmente constatado na prática (para corroborar com estas declarações, ver resultados de um levantamento apresentado à página 8 e na Tabela 3). O fato é que a realização do ajuste de controladores na base da tentativa e erro, é uma tarefa entediante e muitas vezes demorada, o que a torna custosa. Além do mais, esse tipo de ajuste depende muito da experiência do técnico que o realizará. Um outro problema, que surge quando da partida de plantas novas, é o acúmulo de

malhas que devem ser ajustadas, o que acaba levando o pessoal responsável por essa tarefa a colocar “valores padrões”, obtidos em outras malhas semelhantes, até porque o tempo torna-se escasso nessas ocasiões, em virtude do grande número de problemas que surgem.

Pelo que foi exposto acima, referente a utilização profusa de controladores PID, juntamente com as dificuldades existentes na realização de ajuste manual, tornam-se evidentes as vantagens que ferramentas para realizar ajustes, de maneira automática em tais controladores, oferecem para as indústrias. Não é por outro motivo que, segundo Aström *et al.* (1993), os novos produtos lançados no mercado dificilmente deixam de incorporar alguma técnica adaptativa a este tipo de controlador. Segundo a terminologia e as definições apresentadas no trabalho supramencionado, as técnicas adaptativas são classificadas em três grupos:

1. **Ajuste Automático** (“*automatic tuning*” ou “*auto-tuning*”): método no qual o controlador é ajustado automaticamente sempre que o usuário requisitar.
2. **Planejamento de Ganho** (“*Gain Scheduling*”): técnica que altera os parâmetros do controlador de acordo com uma determinada condição de operação (ponto de operação) medida, que pode ser a própria saída do controlador, a medição da variável controlada ou qualquer outro sinal externo.
3. **Controle Adaptativo** (“*Adaptive Control*”): sistema no qual o controlador possui os seus parâmetros ajustados continuamente para compensar mudanças na dinâmica do processo ou perturbações.

Deve-se acrescentar que estas técnicas adaptativas podem ser, e normalmente são, combinadas numa única estratégia adaptativa. Assim, o controle adaptativo normalmente possui um mecanismo de ajuste automático para inicializar o controlador, sendo que neste caso, esse mecanismo é chamado de pré-ajuste (“*pré-tuning*”) ou ajuste inicial (“*initial tuning*”). A combinação de ajuste automático com o planejamento de ganho também facilita sobremaneira a utilização deste último.

Seguindo essa tendência, uma linha de pesquisa vem sendo desenvolvida na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)<sup>5</sup>, dedicada ao desenvolvimento de um controlador PID, denominado de PID-AA (PID AutoAjustável), que incorpora um método de pré-ajuste dos parâmetros, com posterior ajuste do controlador em malha fechada, sempre que necessário, através da utilização de uma base de regras e de um sistema especialista (Abreu, 1992; Arioni, 1991; Caetano, 1992; Kammer, 1992; Maia, 1993; Pagano, 1989). Este controlador, entretanto, possui um desempenho degradado nos casos em que o atraso de transporte do processo for dominante. Além do mais, por ser um controlador de propósito geral, a sua base de regras tornou-se muito extensa (são utilizadas mais de duzentas regras na última versão), praticamente inviabilizando a sua utilização em nível comercial. Por isto, o caminho óbvio a ser seguido, para a continuação dessa pesquisa, é o da redução da base de regras, através da criação de várias delas, cada uma dedicada a um tipo de processo diferente.

Por outro lado, a empresa RIOSOFT<sup>6</sup> concebeu um projeto denominado de **Tecnologia de Automação Integrada (TAI)**, num sistema de parceria com institutos de pesquisa e universidades, indústrias usuárias, fornecedores de *software* e *hardware* e fornecedores de serviços de integração e engenharia. Este projeto tem como objetivo gerar novos produtos e integrar outros já existentes, através dos participantes, de maneira tal a fornecer para o mercado de automação industrial um sistema completo de automação, controle e gerenciamento de processos. Estão especificados no projeto: redes de comunicação, sistema de supervisão de processos, bancos de dados, recursos para realização de controle distribuído e módulos para auxiliar a engenharia, a configuração e a manutenção de todo o sistema (Sani Jr., 1993).

Visando aproveitar a experiência e o conhecimento obtidos na UFSC durante o desenvolvimento do controlador PID-AA citado anteriormente, foi firmado um acordo para que a UFSC fosse uma das universidades parceiras no projeto TAI. O objetivo deste acordo é preencher uma das especificações desse projeto, que são algoritmos de controle com características adaptativas. Num primeiro momento, serão incorporados recursos adaptativos a controladores

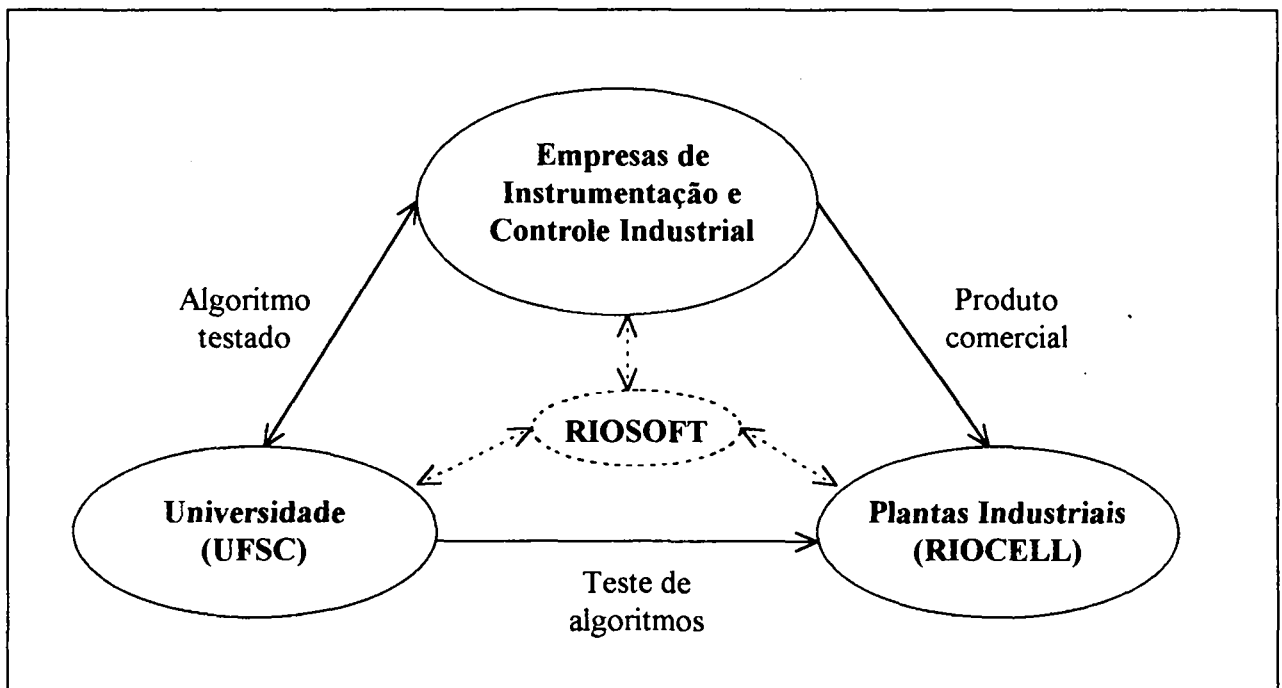
---

<sup>5</sup> Mais especificamente no Laboratório de Controle e Microinformática (LCMI), que é responsável pela área de Sistemas de Controle e Automação Industrial do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da referida universidade.

<sup>6</sup> A RIOSOFT, sediada em Porto Alegre, RS, é uma empresa de engenharia. Atua na área de automação industrial e informática, fornecendo serviços e produtos.

PID para diversos tipos de processos. Depois serão estudados outros tipos de controle para os casos em que o desempenho de controladores PID não for satisfatório. Nesta fase, também serão desenvolvidos sistemas de controle multivariável para unidades inteiras de plantas industriais, como o controle de oxigênio para o processo de delignificação de polpa (na produção de celulose) e o controle de refino.

A relação entre as entidades parceiras dar-se-á da seguinte forma: na universidade serão geradas as propostas de algoritmos para controle, baseando-se em estudos sobre os processos reais e simulações. Estes algoritmos, deverão ser testados em plantas industriais para validá-los, após o que, eles estarão disponíveis para empresas que atuam no mercado de instrumentação e automação industrial para que sejam agregados a produtos comerciais, tornando-os disponíveis para serem utilizados na indústria. Durante todas estas etapas, a RIOSOFT integrará as atividades entre os diversos parceiros. Este ciclo está representado na Figura 1.



**Figura 1 - Projeto TAI: relações entre os parceiros.**

Durante a fase de obtenção de informações sobre os processos industriais e principalmente na fase de validação dos algoritmos, uma das empresas participantes do projeto, a empresa

RIOCELL<sup>7</sup>, coloca as suas instalações industriais a disposição para o levantamento de informações e realização de testes.

No desenvolvimento de propostas adaptativas a serem incorporadas a controladores PID, por causa da diversidade de características que possuem os processos industriais, decidiu-se utilizar o conceito de “Dividir-para-Conquistar”<sup>8</sup> que consiste em resolver um problema difícil, através da divisão do mesmo em problemas menores e independentes, facilitando a compreensão e resolução dos mesmos. Assim, no projeto dos controladores propostos serão levados em consideração os próprios processos que por eles serão controlados, obtendo-se controladores dedicados para cada um dos processos encontrados nas indústrias, ao invés de uma proposta genérica. Além da simplificação na resolução do problema, pode-se também obter controladores que atendam melhor as especificações de desempenho individuais. No cenário dos controladores comerciais já existe um precedente nesta mesma direção. Segundo Aström *et al.* (1993), um grande número de controladores PID são projetados para serem utilizados especificamente em aplicações de controle de temperatura, o que facilitou a implementação de ajuste automático e adaptação para tais controladores, pois a maioria das malhas de temperatura possuem muitas características em comum. Esta foi a principal razão pelo fato do ajuste automático ter sido introduzido mais rapidamente em controladores de temperatura.

A divisão dos processos, para os quais serão desenvolvidos algoritmos monovariáveis dedicados, foi estabelecida em função das variáveis que normalmente são controladas nas indústrias, quais sejam: fluxo, pressão, nível, temperatura, concentração e pH. O presente trabalho descreve os estudos e os desenvolvimentos que conduziram a obtenção de um método de ajuste automático para controladores PI<sup>9</sup> dedicado para processos de fluxo. Dentre os processos citados acima, os processos de fluxo são prioritários dentro do projeto TAI, e por isto foram escolhidos para dar início ao desenvolvimento dos algoritmos, basicamente por três motivos:

---

<sup>7</sup> A RIOCELL (Rio Grande Companhia de Celulose do Sul) é uma empresa nacional pertencente aos grupos privados Klabin, Iochpe e Votorantin. Seu parque industrial localiza-se no município de Guaíba, RS, distante aproximadamente 32 Km de Porto Alegre. Ela produz celulose (300 mil toneladas anuais) e papel (obtido a partir de 10% da sua produção de celulose). Ela exporta 50% de tudo o que produz para 36 países e fatura anualmente US\$ 200 milhões.

<sup>8</sup> Uma das técnicas estruturadas utilizadas na análise, projeto e programação de sistemas (Martin & McClure, 1991).

<sup>9</sup> A justificativa para a utilização de controladores PI para processos de fluxo é apresentada no capítulo 3.

- pela sua maior simplicidade relativa aos outros processos;
- porque, como será visto no capítulo 2, na seção sobre válvulas automáticas, elas são os elementos finais de controle mais utilizados, o que implica que os processos de fluxo, com as suas características, normalmente estarão incluídos, em série, nos laços de controle dos outros processos;
- porque por si só os processos de fluxo representam uma parcela numericamente significativa da totalidade dos processos industriais. Num levantamento realizado em duas unidades pertencentes à planta da RIOCELL, (plantas química e de cloro-soda)<sup>10</sup>, por exemplo, obteve-se a seguinte proporção de malhas de controle, dum total de 71 malhas:

Variável Controlada	Número de malhas	Porcentagem em relação ao total
Fluxo	17	23,9 %
Pressão	30	42,3%
Nível	14	19,7%
Temperatura	6	8,5%
Concentração	2	2,8%
pH	2	2,8%
TOTAL	71	100%

**Tabela 2 - Levantamento dos tipos de malhas nas plantas química e de cloro-soda da RIOCELL.**

Para complementar o levantamento realizado, em alusão às citações à página 3, onde afirma-se que pode-se comprovar facilmente que a ação derivativa em geral não é utilizada por

---

<sup>10</sup> Na planta química são produzidos dióxido de cloro, hipoclorito de sódio e dióxido de enxofre. Estas três substâncias, juntamente com o cloro e a soda, que são produzidos pela outra planta, são insumos básicos para a produção de celulose.

difficultades de ajuste da mesma, é importante ressaltar que das 71 malhas existentes naquela unidade, 90% delas (64 malhas) estavam utilizando controladores PI, sendo o restante (7 malhas) controladas por PID. Não existia nenhum outro tipo de algoritmo de controle sendo utilizado. Além disto, constatou-se que 52 malhas estavam operando em automático (73,2%) e 19 estavam em manual (26,8%), no momento em que a pesquisa foi feita. Portanto, um número bem maior do que aquele (6,6%) apresentado na Tabela 1. Estes dados estão destacados na Tabela 3 e na Tabela 4.

Controlador	Número de malhas	Porcentagem em relação ao total
PI	64	90,1 %
PID	7	9,9%
<b>TOTAL</b>	<b>71</b>	<b>100%</b>

**Tabela 3 - Levantamento dos controladores nas plantas química e de cloro-soda da RIOCELL.**

Modo de Controle	Número de malhas	Porcentagem em relação ao total
Automático	52	73,2 %
Manual	19	26,8%
<b>TOTAL</b>	<b>71</b>	<b>100%</b>

**Tabela 4 - Levantamento dos modos de controle nas plantas química e de cloro-soda da RIOCELL.**

Neste capítulo, procurou-se mostrar a grande utilização que se faz nas indústrias, de controladores do tipo PID, e devido às dificuldades de ajuste dos mesmos, situar a importância que ferramentas de ajuste automático, planejamento de ganho e técnicas adaptativas para controladores do tipo PID podem trazer para o contexto industrial, não apenas referenciando opiniões de outros autores mas também fornecendo dados recentes levantados junto a indústrias. Depois, situou-se o presente trabalho dentro de um projeto (TAI) que esta sendo conduzido por

diversas entidades públicas e privadas, apresentando também, um levantamento de alguns dados sobre os temas que foram tratados aqui, obtido numa planta industrial.

No capítulo 2, será descrito o comportamento estático e dinâmico dos processos de fluxo (incompressível e compressível), levando-se em consideração as principais características, inclusive algumas não-lineares, culminando com a obtenção de um modelo simplificado para esse tipo de processo.

No capítulo 3, em função do modelo dinâmico obtido no capítulo 2, será desenvolvido o método de ajuste inicial de controladores PI dedicado para processos de fluxo, detalhando-se os passos seguidos. Serão também feitas considerações sobre o método de identificação escolhido.

O capítulo 4 apresentará o equipamento, formado por *hardware* (especificado e adquirido) e *software* (desenvolvido), utilizado durante os testes (em malha aberta e malha fechada) em processos de fluxo, bem como alguns detalhes relativos a metodologia usada para que esses testes fossem realizados com segurança na planta industrial da RIOCELL.

O capítulo 5 será dedicado para a apresentação dos resultados conseguidos com o método de ajuste inicial, num processo de fluxo de laboratório e em vários processos de fluxo reais. Esses testes permitiram avaliar o desempenho oferecido pelos ajustes do controlador quando o processo é submetido a mudanças de referência ou perturbações.

Finalmente, o capítulo 6 é utilizado para fornecer conclusões gerais sobre o trabalho realizado, e apresentar as perspectivas para o desenvolvimento de outras técnicas adaptativas, situando-as dentro do projeto TAI.

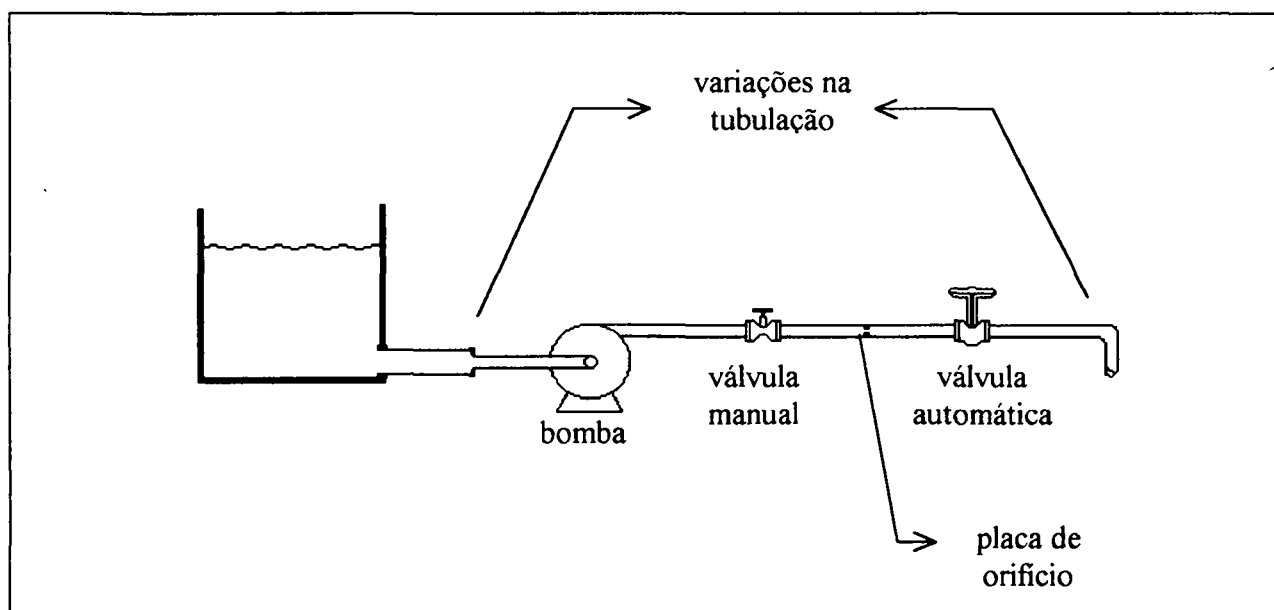


## CAPÍTULO 2

### CARACTERÍSTICAS DOS PROCESSOS DE FLUXO

#### 2.1 INTRODUÇÃO

Conforme a metodologia adotada neste trabalho, neste capítulo será analisado o comportamento de fluidos, quando forçados a escoar através de tubulações, orifícios, válvulas e outros equipamentos encontrados numa malha de controle de fluxo, para então, obter-se um modelo do processo. Na figura abaixo, está representada a estrutura que servirá para a obtenção desse modelo, com os elementos normalmente encontrados nesses processos.



**Figura 2 - Elementos normalmente encontrados em processos de fluxo.**

Pelas suas características particulares, para efeito de estudo, os fluidos são divididos em incompressíveis e compressíveis, sendo cada um deles analisados em seções distintas. Depois disso, em razão da sua grande influência no comportamento (estático e também dinâmico) do

fluxo, serão analisadas as válvulas pneumáticas, que embora não sejam os únicos equipamentos empregados como elemento final de controle numa malha de fluxo, sem dúvida nenhuma, são os mais utilizados nas indústrias. Baseado nessas análises, será proposto um modelo para representar matematicamente os processos de fluxo. Finalizando este capítulo, serão comparados os resultados de testes em dois processos reais, com resultados de simulações utilizando o modelo de fluxo aqui sugerido.

## **2.2 DINÂMICA DE UM FLUIDO EM MOVIMENTO**

As malhas de controle de fluxo apresentam a particularidade de que a variável que se deseja controlar pode ser variada, de forma direta, através da abertura de uma válvula, mas nem por isso apresentam um comportamento tão simples a ponto de ser representado por apenas um ganho constante. Num controle de fluxo, vários fenômenos físicos atuam simultaneamente resultando num comportamento dinâmico não-linear. Tanto Gould (1969, p. 130-136) como Buckley (1979, p. 116-121) fazem analogias entre circuitos elétricos e circuitos de fluxo. Sob esse prisma, são modelados três elementos, num circuito de fluxo, análogos àqueles existentes em circuitos elétricos: resistência, capacitância e "indutância" (inércia). Essa análise fornece uma boa idéia da influência exercida pela natureza física dos fluidos no comportamento dinâmico e estático dos mesmos e será utilizada na subseção 2.2.2, que aborda os fluidos compressíveis.

Por outro lado, sem utilizar-se essa analogia, pode-se apresentar um desenvolvimento que conduz a um modelo dinâmico do fluxo durante a aceleração ou a desaleração do mesmo, levando-se em conta apenas a inércia do fluido. Assim, para os fluidos incompressíveis, pode-se utilizar uma abordagem desse tipo, equivalente à apresentada por Shinskey (1988, p. 76-78), para chegar-se ao modelo matemático dos processos de fluxo para este caso, conforme a subseção seguinte.

### 2.2.1 FLUIDOS INCOMPRESSÍVEIS

Suponha-se um fluido incompressível, passando através de uma tubulação, em regime turbulento<sup>11</sup>, numa linha tal como está representada na Figura 2, na posição horizontal. Suponha-se ainda que existe uma diferença de pressão  $dp$  entre o início e o fim da tubulação. Da mecânica dos fluidos, tem-se as seguintes equações estáticas para a queda de pressão numa linha de fluxo (incluindo-se a queda na tubulação e em outros elementos) e na válvula, para a situação proposta:

$$\Delta p_t = K_t Q^2 \quad (2.1)$$

$$\Delta p_v = \frac{K_v}{a^2} Q^2 \quad (2.2)$$

$K_t$  e  $K_v$  são coeficientes de fluxo que dependem da linha de fluxo e da válvula respectivamente, além do próprio fluido.  $Q$  é o fluxo e  $a$  é o coeficiente (adimensional) de abertura da válvula, sendo que  $a \in [0,1]$ . Como já havia-se adiantado, na constante  $K_t$  podem ser incluídas todas as perdas de carga (pressão) ao longo da linha (com exceção da válvula, já que neste caso está sendo considerada à parte). Essas perdas ocorrem:

- de uma maneira contínua ao longo dos trechos da tubulação com seção reta constante;
- devido às restrições existentes na linha (p. ex. placas de orifício, válvulas manuais com abertura fixa, etc.);
- em consequência de diminuições ou aumentos da seção reta da linha;
- em consequência de mudanças da direção do fluxo;

<sup>11</sup> De acordo com o movimento do fluido, o fluxo pode ser classificado como laminar ou turbulento.

**Fluxo Laminar:** neste caso, partículas adjacentes do fluido terão movimentos paralelos entre si e paralelos também em relação a direção do fluxo, ocorrendo de uma forma ordenada.

**Fluxo Turbulento:** ocorre quando as partículas do fluido possuem movimentos em direções diferentes da do fluxo, ocorrendo cruzamento dos caminhos percorridos pelas partículas do fluido.

O tipo de fluxo pode ser determinado pelo número de Reynolds ( $N_r$ ). Segundo King *et al.* (1948), quando  $N_r < 2100$  o fluxo é laminar e para  $N_r > 3000$  o fluxo será turbulento. O número de Reynolds é dado por:

$$N_r = \frac{d V \omega}{\mu}$$
, onde  $d$  é o diâmetro da tubulação,  $V$  é a velocidade média do fluxo,  $\omega$  é a densidade do fluido e  $\mu$  é a viscosidade do fluido.

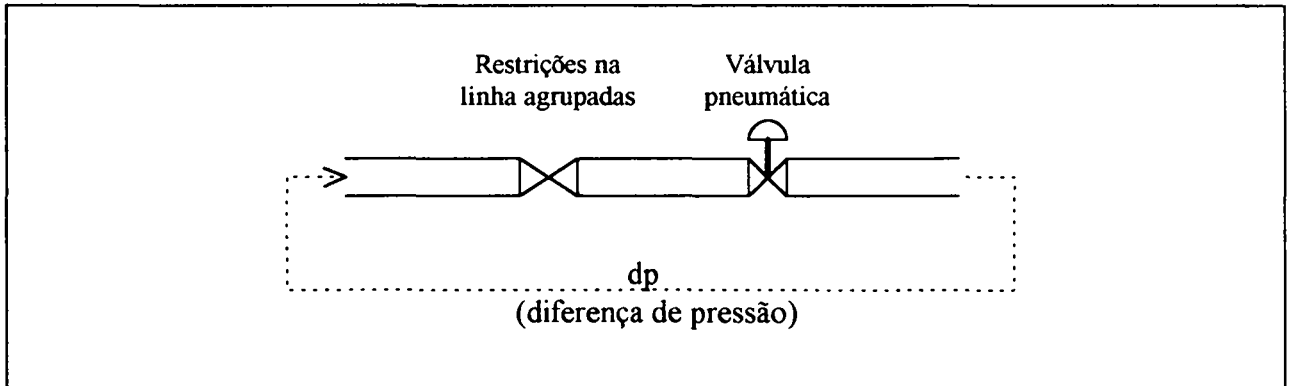
- nas bombas centrífugas.

É claro que para cada caso, diferentes fatores influenciarão na constante de fluxo. Para a tubulação, por exemplo, interessa o diâmetro e a rugosidade do interior da mesma; para variações na seção do condutor, deve ser considerada a relação entre as áreas da seção antes e depois da variação, e assim por diante.

Se a válvula reguladora permanecer sempre com a mesma abertura, então a resistência na linha será fixa, podendo ser representada com uma constante apenas. Maiores detalhes sobre essas perdas de carga podem ser encontradas em King, Wisler e Woodburn (1948), Jones (1953), Driskell (1983), Buckley (1979) e Lipták e Venczel (1985). Já a perda de carga na válvula será vista na próxima seção.

Para o sistema proposto, toda a queda de pressão ocorre na válvula e nas restrições (agrupadas), conforme a Figura 3, e portanto, como elas estão em série, em regime permanente:

$$dp = \Delta p_t + \Delta p_v = (K_t + \frac{K_v}{a^2}) Q^2 \quad (2.3)$$



**Figura 3 - Representação simplificada dos processos de fluxo.**

Em regime transitório, quando houver uma variação no fluxo, existirá também uma força resultante  $F_{res}$  aplicada na massa de fluido contida na linha. Essa força resultante é a diferença entre a força aplicada  $F_a$  (que depende da diferença de pressão) e a força de resistência  $F_r$  (que depende do valor de fluxo e da própria linha):

$$F_a = A \, dp \quad (2.4)$$

$$F_r = AQ^2 \left( K_t + \frac{K_v}{a^2} \right) \quad (2.5)$$

$$F_{res} = F_a - F_r = m_t ac \quad (2.6)$$

onde  $A$  é a área da seção reta da tubulação e  $ac$  é a aceleração à qual o fluido é submetido. Dentro da tubulação, existe uma quantidade de massa  $m_t$  de fluido, cujo valor é dado por

$$m_t = \frac{LA\rho}{g} \quad (2.7)$$

onde  $L$  é o comprimento da tubulação,  $\rho$  é o peso específico do fluido e  $g$  é a aceleração gravitacional. Portanto,

$$F_{res} = m_t ac = m_t \frac{dV}{dt} = \frac{LA\rho}{g} \frac{dV}{dt} \quad (2.8)$$

sendo  $V$  a velocidade do fluido. Como

$$V = \frac{Q}{A} \quad (2.9)$$

combinando as equações (2.4) até (2.9) e rearranjando os termos, obtemos:

$$Q^2 A \left( K_t + \frac{K_v}{a^2} \right) + \frac{L\rho}{g} \frac{dQ}{dt} = A dp \quad (2.10)$$

A equação não-linear (2.10) descreve o comportamento do fluxo em tubulações em relação às mudanças na abertura  $a$  da válvula e às mudanças na diferença de pressão  $dp$  entre as extremidades da tubulação. Para que se analise a constante de tempo e o ganho desse tipo de processo, pode-se linearizar a equação (2.10). Esta linearização será feita em torno de um ponto de operação estável em regime permanente, onde valores de  $Q$ ,  $a$  e  $dp$ , serão designados de  $Q_{rp}$ ,  $a_{rp}$  e  $dp_{rp}$ , respectivamente.

Expandindo-se a derivada do fluxo em relação ao tempo ( $dQ/dt$ ), obtida através da equação (2.10), em uma série de Taylor em torno do ponto em regime permanente, e desprezando-se todos os termos de ordem maior ou igual a dois, obtém-se a seguinte equação linearizada de 1ª ordem:

$$\frac{d\Delta Q}{dt} = \frac{gA}{L\rho} \Delta dp - 2 \frac{gA}{L\rho} \left( K_t + \frac{K_v}{a_{rp}^2} \right) Q_{rp} \Delta Q + 2 \frac{gA}{L\rho} \frac{K_v}{a_{rp}^3} Q_{rp}^2 \Delta a \quad (2.11)$$

onde  $\Delta Q$ ,  $\Delta dp$  e  $\Delta a$  são pequenos desvios em relação aos seus valores de regime permanente:

$$\Delta Q = Q - Q_{rp} \quad (2.12)$$

$$\Delta dp = dp - dp_{rp} \quad (2.13)$$

$$\Delta a = a - a_{rp} \quad (2.14)$$

Ao colocar-se a equação (2.11) na forma

$$\Delta Q + \tau \frac{d\Delta Q}{dt} = G_a \Delta a + G_{dp} \Delta dp \quad (2.15)$$

obtém-se as seguintes equações para a constante de tempo  $\tau$ , o ganho  $G_a$  em relação à variação na abertura da válvula e o ganho  $G_{dp}$  em relação à variação na diferença de pressão  $dp$ :

$$\tau = \frac{L\rho}{2gA} \frac{Q_{rp}}{dp_{rp}} \quad (2.16)$$

$$G_a = \frac{Q_{rp}}{a_{rp}} \frac{K_v}{K_v + a_{rp}^2 K_t} \quad (2.17-A)$$

$$G_a = \sqrt{\frac{(dp_{rp} - K_t Q_{rp}^2)^3}{K_v}} \frac{1}{dp_{rp}} \quad (2.17-B)$$

$$G_{dp} = \frac{Q_{rp}}{dp_{rp}} \quad (2.18)$$

Na equação (2.16) pode-se substituir  $dp_{rp}$  por

$$dp_{rp} = Q_{rp}^2 \left( K_t + K_v / a_{rp}^2 \right) \quad (2.19)$$

donde obtém-se a seguinte equação para  $\tau$ :

$$\tau = \frac{L\rho}{2gA} \frac{1}{Q_{rp} \left( K_t + K_v / a_{rp}^2 \right)} \quad (2.20)$$

Esta última equação aplica-se para o caso em que existe uma válvula com uma abertura fixa, o que implica em uma resistência fixa ao fluxo, sendo este controlado através de uma bomba cuja velocidade pode ser variada. Nesse caso, a atuação ocorre na diferença de pressão  $dp$ , e como se pode notar pela equação (2.20), a constante de tempo varia inversamente com o fluxo. Para o valor de fluxo máximo  $Q_{\text{máx}}$ , obtém-se o valor mínimo de  $\tau$  ( $\tau_{\text{min}}$ ), sendo  $\tau_{\text{min}} > 0$ .

Entretanto, o caso mais comum, sem dúvida nenhuma, é aquele no qual varia-se a abertura de uma válvula, mantendo-se a diferença de pressão constante, a menos que ocorra alguma perturbação. A equação para avaliar  $\tau$ , nesse caso, é a (2.16), e portanto,  $\tau$  é diretamente proporcional ao fluxo, de tal maneira que  $\tau \rightarrow 0$  quando  $Q \rightarrow 0$ . Para avaliar a ordem de grandeza da constante de tempo desse tipo de processo, Shinskey (1988, p. 78) fornece um exemplo numérico, onde supõe que através de uma tubulação esteja fluindo água, sendo que os seguintes valores são atribuídos para as variáveis da equação (2.16):

$$L = 60,96\text{m} = 200\text{ft}$$

$$Q_p = 6,315 \times 10^{-4} \text{ m}^3 / \text{s} = 10 \text{ gal} / \text{min} = 0,0223 \text{ ft}^3 / \text{s}$$

$$\rho = 9.806 \text{ N} / \text{m}^3 = 999,65 \text{ Kg} / \text{m}^3 = 62,4 \text{ lb} / \text{ft}^3$$

$$g = 9,81 \text{ m} / \text{s}^2 = 32,2 \text{ ft} / \text{s}^2$$

$$A = 5,574 \times 10^{-4} \text{ m}^2 = 0,006 \text{ ft}^2$$

$$dp_p = 137.894 \text{ N} / \text{m}^2 = 20 \text{ lb} / \text{in}^2 = 2880 \text{ lb} / \text{ft}^2$$

A substituição destes valores na equação de  $\tau$  (2.16), resulta em  $\tau = 0,250\text{s}$ , indicando que a ordem de grandeza para a constante de tempo desse tipo de processo, embora variável, é da ordem de alguns décimos de segundo. No desenvolvimento acima, duas considerações importantes foram feitas. A primeira foi de que o fluxo era turbulento e a segunda de que o fluido era incompressível. Se o fluxo for laminar, a relação entre queda de pressão e fluxo será linear e não quadrática. Entretanto, o fluxo turbulento é uma situação corriqueira, como afirma Gould (1969, p. 145) de maneira categórica. A segunda consideração sobre a compressibilidade do fluido, merece uma análise mais detalhada, conforme a próxima subseção.

### 2.2.2 FLUIDOS COMPRESSÍVEIS

Ao contrário dos líquidos, o efeito da inércia no fluxo de gases é desprezível em virtude da sua pequena densidade. Para fluidos gasosos, a expansão ou contração, causado pelas mudanças na pressão é o efeito dominante na dinâmica dos mesmos. Para esses casos, utiliza-se o conceito de capacitância, em analogia a circuitos elétricos, para modelar o referido efeito. A capacitância no fluxo é definida como:

$$C = \frac{Q}{dP/dt} \quad (2.21)$$

sendo  $C$  a capacitância,  $Q$  o fluxo e  $P$  a pressão. Para fluidos compressíveis, Gould (1969, p. 131-133) define três tipos de capacitância, dependendo da maneira como ocorrem as expansões:

1. Compressão (ou expansão) adiabática:

$$C = \frac{Vl}{\gamma \bar{P}} \quad (2.22)$$

onde  $Vl$  é o volume do gás,  $\bar{P}$  é a pressão absoluta média e  $\gamma$  é a relação entre os calores específicos do gás ( $\gamma = c_p/c_v$ ).

2. Compressão (ou expansão) isotérmica:

$$C = \frac{Vl}{\bar{P}} \quad (2.23)$$

3. Compressão (ou expansão) politrópica:

$$C = \frac{Vl}{n \bar{P}} \quad (2.24)$$

onde  $1 < n < \gamma$ .

Essas relações estão linearizadas em torno da pressão média  $\bar{P}$ .

Gould (1969, p. 132-133) afirma que para expansões lentas do fluido vale a condição isotérmica, e nas rápidas a condição adiabática, sendo a politrópica um meio termos entre as duas primeiras. Buckley (1979, p. 117) afirma o mesmo, complementando que, de maneira geral, para tanques e tubulações com flutuação rápida no fluxo e na pressão, deve ser assumida a condição



adiabática, e que para tubulações longas, nas quais essas variações ocorrem de maneira lenta, a condição que melhor se aplica é a isotérmica.

A resistência num circuito de fluxo é definida como sendo a variação na diferença de pressão em relação a variação de fluxo (Weber, 1973, p. 174), ou seja:

$$R = \frac{\partial p}{\partial Q} \quad (2.25)$$

Considerando-se o fluxo turbulento, a relação existente entre queda de pressão e fluxo é mais complicada para o caso dos fluidos compressíveis do que para os incompressíveis. O problema é que a relação  $Q \times dp$  sofre uma mudança quando o *fluxo crítico* é atingido. Este fluxo crítico ocorre quando a pressão  $P_2$ , após uma restrição pela qual o fluido está passando, cai para menos de 55% do valor da pressão  $P_1$ , antes da restrição (Buckley, 1979, p. 19). Para valores de  $P_2/P_1 < 0,55$  o fluxo atinge uma velocidade conhecida como *velocidade sônica* (ou *fluxo sônico*) e torna-se independente do valor de  $P_2$ , pois, nesse estado, os distúrbios de pressão ocorridos após a restrição não se propagam para antes da mesma. Portanto, neste caso,  $Q \propto P_1$ . Por outro lado, se o fluxo for subsônico ( $P_2/P_1 > 0,55$ ) pode-se aproximar<sup>12</sup> a relação entre fluxo e pressão por uma lei quadrática, como para o fluxo incompressível. Se este for o caso, tem-se de forma aproximada,  $Q \propto \sqrt{(P_2 - P_1)}$  (Gould, p. 136), e a resistência é dada por

$$R = \frac{\partial p}{\partial Q} = \frac{2 \bar{dp}}{\bar{Q}} \quad (2.26)$$

Todo o desenvolvimento desta subseção (2.2.1) e da anterior (2.2.2) demonstra que a dinâmica do fluxo é variável de acordo com o ponto de operação. Contudo, quando considera-se os outros elementos envolvidos na malha de controle de fluxo, em especial a válvula reguladora, observa-se que a dinâmica do fluxo é muito mais rápida do que a dinâmica da própria válvula. O próprio transmissor pode ter uma resposta mais lenta (Gould, 1969, p. 137). Distâncias grandes em linhas de sinais pneumáticos também podem introduzir atrasos significativos (Shinsky 1988, p. 50-51). Hoje em dia, entretanto, a transmissão dos sinais é baseada em eletrônica analógica e

<sup>12</sup> A fórmula exata, apresentada por Gould (1969, p. 135), está no anexo 1.

cada vez mais em eletrônica digital, eliminando os problemas de atraso que existem em linhas pneumáticas. Como já foi frisado anteriormente, as válvulas com acionamento pneumático, que normalmente é o caso nas indústrias, possuem uma dinâmica lenta que é dominante nos processos de fluxo. Por esse motivo, elas serão estudadas com o intuito de levantar o modelo dinâmico das mesmas, além da influência que elas exercem no ganho dos processos de fluxo.

## **2.3 VÁLVULAS PNEUMÁTICAS**

Num laço de controle, o elemento final de controle (ou atuador) é o equipamento que implementa, no processo, a ação calculada pelo controlador. Dentre os vários tipos de elemento final, o mais utilizado é a válvula automática. Sighieri e Nishinari (1973, p. 153), por exemplo, afirmam que 90% dos casos numa indústria química possuem válvulas como elemento final de controle.

Válvula de controle é um tema muito extenso e pode ser abordado de diversas maneiras, dependendo do que se quer estudar ou analisar. Nesse caso, o grande interesse reside no comportamento dinâmico e estático das válvulas. Assim, não serão abordadas características construtivas detalhadas (material do corpo, número de sedes, etc.) nem questões de dimensionamento das válvulas. Apenas os itens relevantes para a análise proposta é que serão vistos.

Outro detalhe importante é que existem vários tipos de acionamento. O acionamento é o mecanismo da válvula responsável pela transformação do sinal de entrada, seja elétrico ou pneumático, no movimento necessário para abrir ou fechar a válvula. Eles podem ser pneumáticos, por pistão, eletro-hidráulico ou eletromecânico. Apenas o primeiro será analisado por constituir-se no mais utilizado (Smith & Corripio, 1985, p. 575).

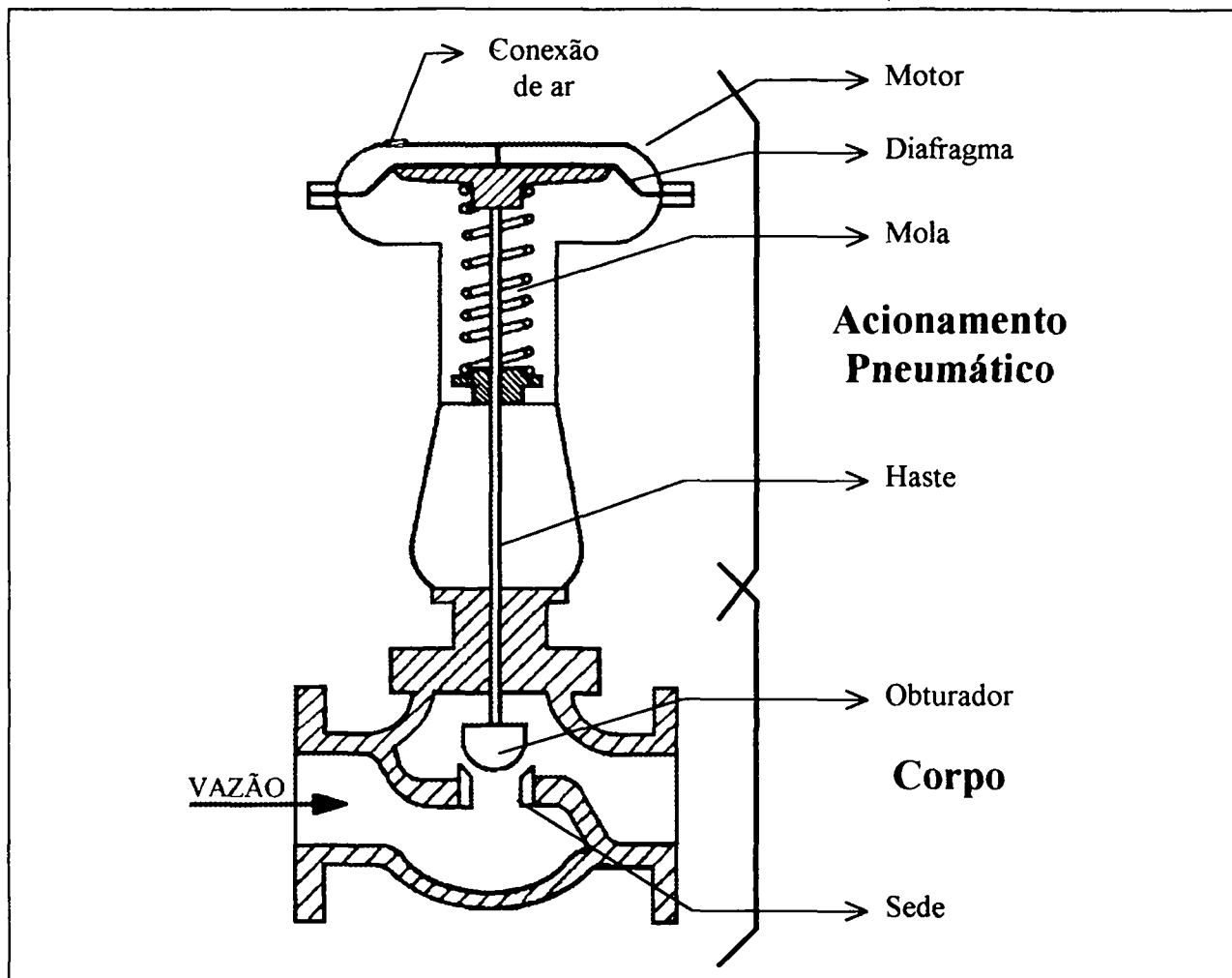
### **2.3.1 PRINCÍPIO BÁSICO DE FUNCIONAMENTO E COMPONENTES PRINCIPAIS**

Na Figura 4<sup>13</sup>, está representada uma válvula pneumática de maneira simplificada, com os

---

<sup>13</sup> Adaptada da figura 4.2h do texto de Lipták e Venczel (1985, p. 321).

detalhes de interesse em destaque. Existem duas partes principais: o corpo da válvula, que é por onde passa o fluido e, portanto, aonde se localiza a restrição ao fluxo, e o acionamento, que como já foi explicado, é responsável pela abertura ou fechamento da mesma.



**Figura 4 - Válvula pneumática.**

Na parte superior do acionamento, está localizado o motor da válvula, que é quem recebe o sinal pneumático de controle. Dentro do motor existe uma membrana flexível (ou diafragma) e uma mola. De acordo com a pressão que chega na válvula, a membrana é impelida para cima ou para baixo, até que encontre uma posição de equilíbrio em conjunto com a mola, com os atritos e com as forças de pressão no obturador. Entre o corpo e o motor da válvula existe uma haste. Na extremidade de cima, a haste fica presa à placa do diafragma, e na extremidade de baixo, ao obturador. Assim, o movimento da membrana é transmitido diretamente para o obturador. Como

pode-se notar, o obturador está localizado no interior do corpo da válvula, onde também se localiza o orifício por onde se dá o fluxo, sendo esse orifício denominado de sede da válvula. Na medida em que o obturador se move em direção à sede da válvula, o fluxo é restringido através da diminuição da área do orifício e vice-versa.

### 2.3.2 CURVAS DE ABERTURA X FLUXO DAS VÁLVULAS

Como descrito na seção anterior, a haste se move em função do sinal de controle  $u$  enviado para a válvula. Esse movimento é diretamente proporcional ao sinal de controle. Designando-se o deslocamento da haste de  $x$ , pode-se escrever que  $x = u$ , onde  $x$  e  $u$  estão normalizados entre 0 e 1. Já o fluxo resultante em função da posição da haste irá depender da forma geométrica do obturador. Stephanopoulos (1984, p. 254-255) apresenta o corte lateral de vários tipos de obturadores, com as suas respectivas características (funções matemáticas) resultantes, que serão vistas a seguir. A característica normalizada (e portanto adimensional) do fluxo  $f$  em função da posição da haste  $x$ , é normalmente do tipo linear ou igual-porcentagem, mas outras relações para  $f(x)$  serão também apresentadas.

- Linear:

$$f(x) = \frac{1}{R} + \left(1 - \frac{1}{R}\right)x \quad (2.27)$$

- Igual-porcentagem:

$$f(x) = R^{x-1} \quad (2.28)$$

- Raiz Quadrada:

$$f(x) = \frac{1}{R} + \left(1 - \frac{1}{R}\right)\sqrt{x} \quad (2.29)$$

- Parabólica:

$$f(x) = \frac{1}{R} + \left(1 - \frac{1}{R}\right)x^2 \quad (2.30)$$

- Hiperbólica:

$$f(x) = \frac{1}{R - (R-1)x} \quad (2.31)$$

Essas equações são conhecidas como *característica inerente* da válvula. A constante  $R$ , denominada de “rangeabilidade” (*rangeability*) é a relação entre o fluxo máximo e o fluxo mínimo que podem ser controlados pela válvula:

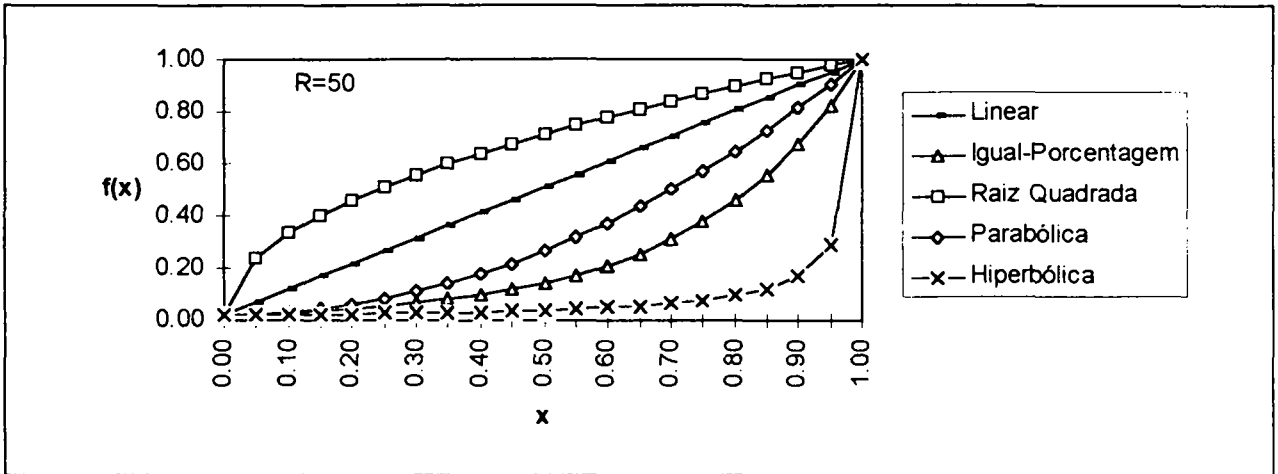
$$R = \frac{Q_{\max}}{Q_{\min} \big|_{\text{controlável}}} \quad (2.32)$$

Abaixo do valor de  $Q_{\min}$ , a válvula tende a fechar completamente. Segundo Gould (1969, p. 344), esta relação varia entre os valores de 20 e 70. Smith e Corripio (1985, p. 144) admitem que os conceitos de fluxo máximo e mínimo controláveis são muito subjetivos, e por isso, muitas vezes define-se o fluxo controlável como sendo aquele compreendido entre 10% e 90% de abertura da válvula ou como sendo o fluxo entre 5% e 95% de abertura. Afirmam, ainda, que o valor de  $R$  situa-se entre 20 e 50. Na Figura 5, apresenta-se um gráfico contendo todas as curvas apresentadas anteriormente, sendo  $R = 50$ . Como o fluxo está normalizado,  $f(1) = 1$ , e como  $R = 50$ ,  $f(0) = 0,02$ .

Quando a válvula é colocada numa linha de fluxo, ocorre uma influência desta sobre as curvas de fluxo das válvulas. O comportamento resultante da interação da válvula com a linha de fluxo, é denominada de *característica instalada* das válvulas, numa referência ao fato de que esse comportamento é, de fato, uma característica do sistema de fluxo no qual a válvula está instalada, incluindo-se esta, e não depende apenas da válvula. A característica inerente das válvulas só é verificada quando a queda de pressão que ocorre na válvula é constante para qualquer valor de fluxo. Entretanto, o que ocorre numa situação real é uma queda variável de pressão na válvula, quando numa linha de fluxo, em função dos outros componentes que estão presentes e que possuem uma relação quadrática entre a queda de pressão e o fluxo. A equação que fornece o fluxo de líquidos nas válvulas, levando em conta a queda de pressão, é:

$$Q = f(x)C_v \sqrt{\frac{\Delta p}{D}} \quad (2.33)$$

$Q$  é o fluxo,  $C_v$  é o coeficiente de fluxo da válvula,  $\Delta p$  é a queda de pressão na válvula,  $D$  é a densidade específica do fluido – relação entre a densidade do fluido e a densidade da água ( $\rho_{\text{fluido}}/\rho_{\text{água}}$ ) – e  $f(x)$  é a característica inerente. Os valores de  $C_v$  fornecidos pelos fabricantes, requerem que normalmente a pressão seja dada em [psi] e o fluxo em [gpm].

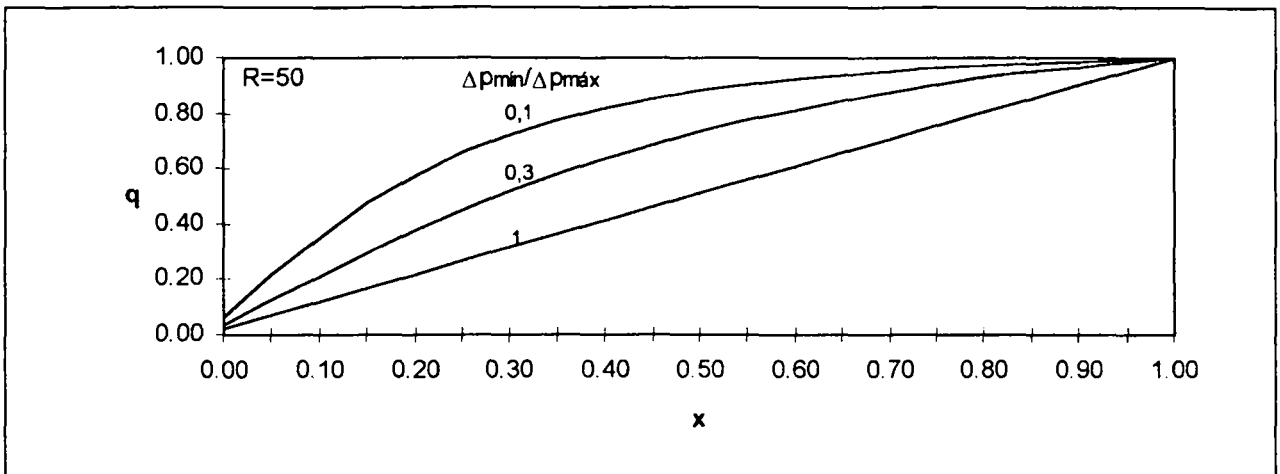


**Figura 5 - Características inerentes das válvulas.**

A queda de pressão mínima na válvula ( $\Delta p_{\min}$ ) ocorre quando o fluxo assume o valor máximo ( $Q_{\max}$ ), e a queda de pressão máxima ( $\Delta p_{\max}$ ) quando o fluxo tem o seu valor mínimo ( $Q_{\min}$ ), pois, neste caso, as demais perdas de carga são muito baixas devido ao valor pequeno de fluxo. Utilizando então a equação (2.33), após algum desenvolvimento, que pode ser visto em Shinskey (1988, p. 61), pode-se encontrar a seguinte equação, para a característica instalada das válvulas, em função da relação entre a queda de pressão mínima e máxima ( $\Delta p_{\min}/\Delta p_{\max}$ ) na válvula:

$$q = \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{1}{f(x)^2} - 1 \right) \frac{\Delta p_{\min}}{\Delta p_{\max}}}} \quad (2.34)$$

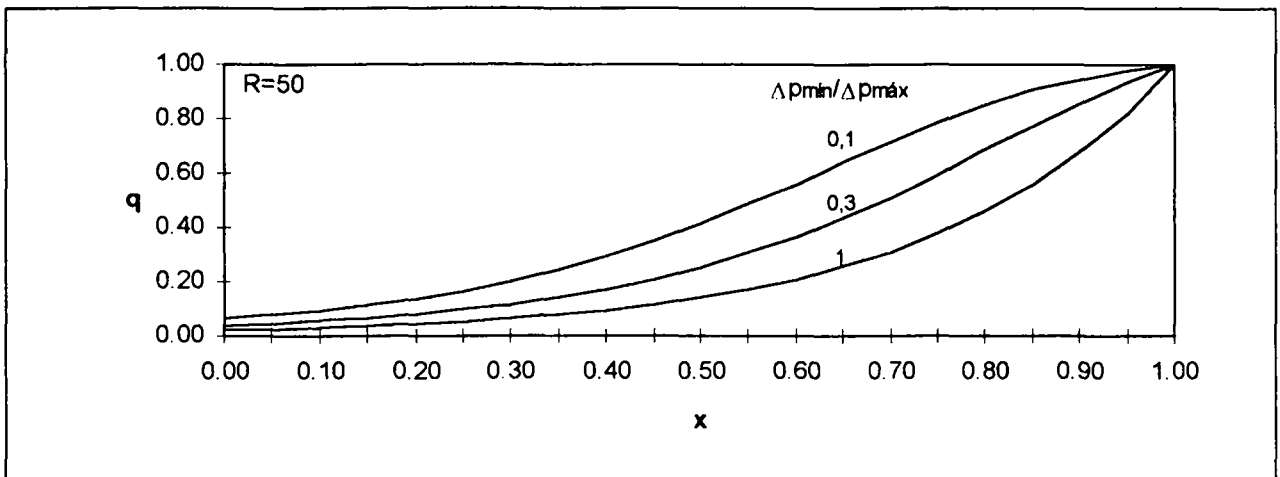
A função  $f(x)$  é a característica inerente da válvula e a variável  $q$  é o fluxo normalizado (entre 0 e 1). Para as válvulas linear e igual-porcentagem são traçadas as curvas da característica instalada para três valores diferentes de  $\Delta p_{\min}/\Delta p_{\max}$  na Figura 6 e na Figura 7.



**Figura 6 - Característica instalada da válvula linear para  $\Delta p_{\min}/\Delta p_{\max} = 0,1$ ,  $0,3$  e  $1$ , com  $R = 50$ .**

As duas últimas equações são válidas para os fluidos incompressíveis. Para os fluidos compressíveis, a equação que descreve o fluxo nas válvulas é mais complicada devido à possibilidade de que o sistema atinja a condição de fluxo crítico, e até mesmo os fabricantes de válvulas apresentam diferenças nas suas equações. Smith e Corripio (1985, p. 141-143), por exemplo, apresentam equações de dois fabricantes<sup>14</sup>. O primeiro deles, a Masoneilan, introduz um polinômio de 3ª ordem para levar em conta o fluxo crítico. O segundo, a Fischer Controls, representa essa situação através de uma função senoidal. Entretanto, como já havia sido ressaltado, Smith e Corripio comprovam através de aproximações, que quando o fluxo se encontra abaixo do fluxo crítico, essas equações aproximam-se daquela que descreve o fluxo incompressível.

<sup>14</sup> Estas equações são apresentadas no anexo I.



**Figura 7 - Característica instalada da válvula igual-porcentagem para  $\Delta p_{\min}/\Delta p_{\max} = 0,1$ ,  $0,3$  e  $1$ , com  $R = 50$ .**

Considerando-se as informações desta subseção, conclui-se que a curva do fluxo em função da abertura de uma válvula, e portanto, o ganho de um processo de fluxo, é variável e depende dos seguintes fatores:

- tipo da válvula;
- valor da diferença de pressão sobre o sistema;
- dos próprios elementos introduzidos na linha de fluxo, pois uma mesma válvula em dois sistemas diferentes pode apresentar comportamento estático diferente;
- do próprio fluido;

Para fluidos compressíveis, pode existir ainda uma forte mudança de comportamento do fluxo se a condição de fluxo crítico for atingida.

Uma excelente análise sobre a sensibilidade do ganho do processo controlado, em relação a perturbações sustentadas na pressão do sistema de fluxo, é feita por Gould (1969, p. 344-349). Nessa análise, considera-se que o sistema de controle em malha fechada atuará de forma a manter o fluxo no mesmo valor que estava antes da perturbação. É claro que se a perturbação possuir uma amplitude muito elevada, talvez ocorra uma perda da capacidade de se controlar o processo em determinados pontos de operação, uma vez que este poderá ficar com uma faixa de operação



menor, e o fluxo, nesse caso, não poderia ser mantido. Os resultados de Gould mostram curvas da variação do ganho em relação à variação de pressão disponível para o sistema. Fica evidente que a válvula do tipo igual-porcentagem é bem menos sensível a variações desse tipo, em relação às válvulas do tipo linear e parabólica, que também foram analisadas. Pode-se observar também o fato de que uma diminuição na pressão provoca uma variação no ganho do processo bem mais acentuada do que no caso da pressão ser aumentada.

### 2.3.3 COMPORTAMENTO DINÂMICO DAS VÁLVULAS PNEUMÁTICAS

Uma válvula pneumática sempre possui algum atraso dinâmico, pois uma mudança de pressão aplicada ao motor da válvula não possui uma resposta instantânea de movimento da haste. Devido à característica construtiva e de operação das válvulas pneumáticas, a dinâmica apresentada pelas mesmas é inerentemente de 2ª ordem.

Observando-se a Figura 4, pode-se concluir que as forças envolvidas no movimento da válvula são três:

- força exercida pelo diafragma:

$$PA \quad (2.35)$$

onde  $P$  é o sinal de pressão sobre o diafragma e  $A$  é a área deste;

- força da mola:

$$K_e x \quad (2.36)$$

onde  $K_e$  é a constante de Hooke da mola e  $x$  é o deslocamento da haste;

- força de atrito entre a haste e as partes fixas da válvula que estão em contato:

$$\mu_d \frac{dx}{dt} \quad (2.37)$$

onde  $\mu_d$  é o coeficiente de atrito dinâmico.

Existe a força peso da parte móvel, caso a válvula esteja na posição horizontal. Contudo, por ser constante, será desconsiderada na equação, pois deseja-se obter a função de transferência entre a

variação de pressão e o movimento da haste. Uma força que também será considerada constante, e por esse motivo não entrará na análise, é a pressão exercida pelo fluido sobre o obturador da válvula.

Através da Lei de Newton, obtém-se:

$$PA - K_e x - \mu_d \frac{dx}{dt} = m_m \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (2.38)$$

onde  $m_m$  é a massa das partes móveis da válvula. Aplicando-se a Transformada de Laplace na equação anterior, obtém-se a função de transferência do deslocamento em relação à variação da pressão:

$$\frac{\bar{x}(s)}{\bar{P}(s)} = \frac{A/K_e}{(m_m/K_e)s^2 + (\mu_d/K_e)s + 1} \quad (2.39)$$

Stephanopoulos (1984, p. 211) afirma que normalmente  $m_m \ll K_e$ . A implicação disso é que o comportamento da válvula pneumática pode ser aproximado por uma equação de 1ª ordem. Com essa aproximação, concordam outros autores da área de controle de processos, como pode ser visto em Coughanowr e Koppel (1965, p. 115-116), Coughanowr (1991, p. 127-128) e Ceaglske (1956, p. 87), sendo que os primeiros afirmam que esse modelo de 1ª ordem foi obtido através de experimentos práticos em válvulas pneumáticas.

Quando necessário, a dinâmica da válvula pode ser acelerada mediante a utilização de:

- um aplicador de sinal (“*booster*”), que recebe um sinal fraco e amplifica-o através de uma fonte de alimentação. O ganho desses equipamentos pode ter vários valores, como por exemplo 1/5, 1/3, 0,5, 1, 2 ou 3 (Smith e Corripio, p. 579-580);
- um posicionador, que é um mecanismo que atua como um controlador proporcional com ganho muito alto – de 10 a 200, segundo Lipták e Venczel (1985, p. 446) – em malha fechada, tendo como referência o sinal do controlador e como medição a posição da haste da válvula. Ele não só acelera a resposta da válvula, como também garante uma precisão maior no posicionamento da haste.

É interessante ressaltar que, segundo muitos autores, não é recomendada a utilização de posicionadores com malhas muito rápidas. Para esses casos, sugere-se a utilização de

amplificadores de sinal. O problema que poderia surgir está relacionado com a estabilidade – ver Lipták e Venczel (1985, p. 446). Shinskey (1988, p. 221-222) é mais explícito ao dizer que o posicionador não é aconselhado para malhas de fluxo e de pressão de líquido, pois o ganho da válvula é aumentado em 2 ou mais, na faixa de resposta entre 0,5 Hz e 2 Hz, onde se encontra a frequência natural dessas malhas. Por isso, com um posicionador, o ganho do controlador deveria ser reduzido pela metade para que se mantivesse a mesma estabilidade, mas perdendo-se desempenho em malha fechada como consequência disso.

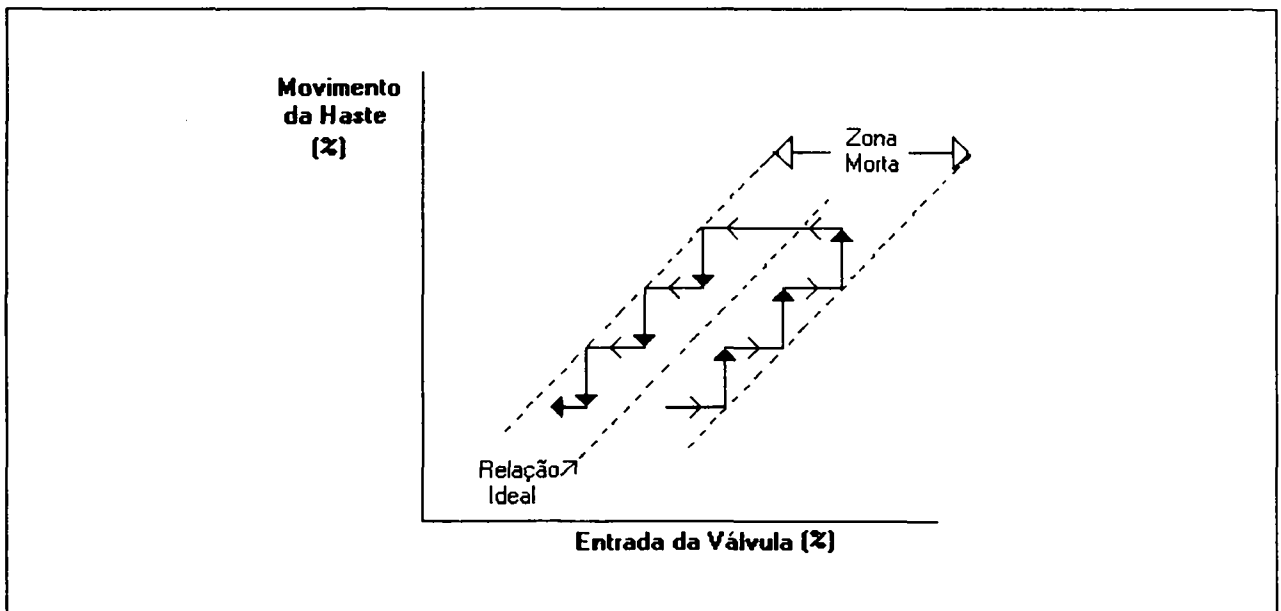
A dinâmica da válvula poderá ou não ter importância no comportamento da malha de controle. Tudo dependerá de como é a resposta do processo. Se o processo for lento, como o são a maioria dos processos industriais, o atraso na resposta da válvula poderá ser desprezado, sendo o seu comportamento representado apenas por um ganho. Caso contrário, a dinâmica da válvula terá de ser considerada. A constante de tempo de uma válvula, segundo Gould (1969, p. 137) é da ordem de 1 a 30 segundos. Coughanowr e Koppel (1965, p. 116) fornecem como valor típico para essa constante 10 segundos. Esses dados são para válvulas sem posicionador.

Coughanowr (1991, p. 128) diz que a maioria dos processos industriais comportam-se como processos de 1ª ordem ou uma série destes, possuindo constantes de tempo que variam de um minuto a uma hora. Quanto aos processos de fluxo, especificamente, como se viu na seção anterior, possuem uma resposta muito rápida, da ordem de décimos de segundo. Claramente, esse é um tipo de processo no qual a dinâmica da válvula não é apenas importante, mas mais do que isso, ela é dominante.

### **2.3.4 ZONA MORTA NAS VÁLVULAS**

Este comportamento surge do atrito estático existente entre a haste e as partes fixas da válvula, notadamente com os meios de vedação, resultando numa característica não-linear denominada de zona morta, que corresponde a uma falta de movimento da haste (saída) enquanto a variação no sinal de controle (entrada) não ultrapassar um certo valor mínimo. Embora a maioria dos autores que abordam este assunto descrevam essa não linearidade com a mesma característica que ocorre em engrenagens mecânicas, nas quais o movimento da haste ocorreria de forma gradual após vencido o valor mínimo de sinal na entrada da válvula, resultados obtidos em

simulação mostraram evidências de que essa não linearidade provoca um pequeno salto, de maneira abrupta, assim que o movimento da haste é iniciado, conforme a descrição apresentada por Bialkowski (1994). Na Figura 8, apresenta-se o que ocorre com a válvula quando ela é sujeita a variações pequenas no sinal de entrada, numa determinada direção, e depois na outra. Portanto, sempre que a válvula encontrar-se numa situação de repouso, mesmo que por um instante de tempo muito pequeno, enquanto não houver força suficiente para vencer o atrito estático, o que corresponde a uma variação no sinal de controle abaixo de um valor mínimo, a válvula não apresentará resposta, e quando ela apresentar, o fará de uma maneira abrupta, no início do movimento. Segundo Clair (1993, p. 68), pode ocorrer até mesmo sobrepasso na posição da válvula no momento do movimento abrupto (caso o impulso no movimento seja demasiadamente forte), ou ainda, pode ocorrer que a válvula apresente movimento, só que mais lento do que o normal (assemelhando-se a um atraso de transporte pequeno), mesmo para uma variação pequena no sinal da entrada.



**Figura 8 - Característica de zona morta nas válvulas.**

Essa não-linearidade, caracteriza-se por possuir caminhos diferentes, dependendo se o sinal é crescente ou decrescente. No comportamento de malha fechada, a sua presença pode causar oscilações sustentadas (*ciclo-limite*), que além de indesejáveis do ponto de vista de controle, podem ainda causar danos na própria válvula. A utilização de um posicionador reduz os

efeitos desta característica. Shinskey (1988, p. 221) mostra num gráfico a resposta em frequência de um acionador Foxboro P50, com e sem posicionador. Pode-se observar que, com posicionador, há um aumento no ganho da resposta da válvula em todas as frequências analisadas e um aumento na frequência de corte do sistema. Há também uma melhora, não muito acentuada, na fase do sistema. O problema causado por essa não-linearidade, não pode ser resolvido pelo controlador. Ela será abordada novamente no capítulo 5, que trata dos resultados.

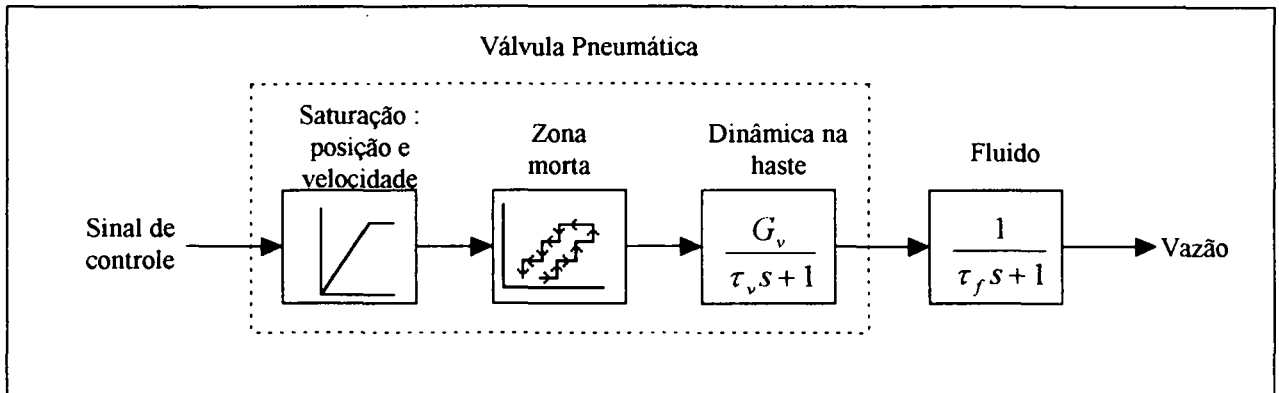
### **2.3.5 LIMITE DE VELOCIDADE**

Shinskey (1988, p. 179-181) aborda uma característica que, segundo ele, ocorre com a maioria dos acionadores, e portanto, com os acionadores pneumáticos. Existe um limite de velocidade máxima além da qual o acionador não poderá responder, independentemente do sinal enviado pelo controlador, devido à limitação na quantidade de energia que pode ser fornecida para o mesmo. Por isso, os acionadores, aparentemente, respondem mais rapidamente a um sinal com amplitude pequena do que a um sinal com grande amplitude. O ganho dessa não-linearidade é inversamente proporcional à amplitude e à frequência do sinal de entrada, o mesmo ocorrendo com a fase que, para sinais grandes, e/ou com frequência elevada, tende para  $-90^\circ$ . Como consequência prática disso, quando ocorre uma perturbação forte no sistema, o sinal de controle também sofrerá uma variação grande, introduzindo atraso de fase em malha fechada, o que por sua vez causará um aumento no período de resposta do sistema. Por isso, para garantir a estabilidade do sistema, considerando-se a amplitude dos sinais, deve-se ajustar o controlador na situação em que ocorre uma grande excursão no sinal de controle.

## **2.4 O MODELO DAS MALHAS DE FLUXO**

Pelo que foi exposto nas seções anteriores, existe na malha de vazão a dinâmica do fluido e da válvula. Pelos desenvolvimentos matemáticos e através das informações contidas na bibliografia que aborda esse assunto, concluiu-se que a primeira dinâmica varia de acordo com o ponto de operação, mas é muito rápida em comparação com a segunda, e por isso, pode ser desprezada. Já o ganho do sistema depende de todos os componentes da linha de fluxo e é variável com o ponto de operação. Existem ainda outras características não-lineares introduzidas

pela válvula. É claro que se a linha de transmissão dos sinais for pneumática, o que é cada vez mais raro hoje em dia, poderá existir ainda mais uma dinâmica de primeira ordem e um atraso puro devidos à linha pneumática, embora, na presente análise, isso não esteja sendo considerado. O sistema completo está representado por blocos na Figura 9.



**Figura 9 - Diagrama de blocos da malha de fluxo: dinâmica da válvula pneumática mais a dinâmica do fluido.**

Como a dinâmica da válvula é muito mais lenta do que outras dinâmicas na malha de fluxo, pode-se aproximar a dinâmica resultante para processos de fluxo por um modelo de 1ª ordem, cuja constante de tempo será próxima da constante de tempo da válvula, e designada por  $\tau$ . Segundo Shinskey (1988, p. 80), as outras dinâmicas da malha de fluxo (transmissor e qualquer outro equipamento para condicionamento de sinais), são semelhantes e independentes (não interativas), sendo que a sua combinação assemelha-se muito a um atraso de transporte.

Para levar em consideração essas dinâmicas, será acrescentado ao modelo um atraso de transporte puro, que será designado por  $L$ , resultando num termo do tipo  $e^{-Ls}$  na função de transferência do processo. As características não-lineares não serão levadas em consideração no modelo utilizado no presente trabalho, mas devem ser incluídas em modelos mais elaborados. Desse modo, o modelo utilizado para processos de fluxo, neste estudo, é dado por

$$\frac{y(s)}{u(s)} = \frac{G}{\tau s + 1} e^{-sL} \quad (2.40)$$

onde  $u$  é o sinal de controle e  $y$  é o fluxo. O ganho da válvula é o próprio ganho do sistema de fluxo. Este parâmetro é variável com o ponto de operação, sendo dado pela derivada da característica instalada da válvula. A equação (2.34), que descreve a característica instalada, está normalizada em relação ao fluxo máximo. Como

$$Q = q Q_{\text{máx}} \quad (2.41)$$

e

$$Q_{\text{máx}} = C_v \sqrt{\frac{\Delta p_{\text{mín}}}{G}} \quad (2.42)$$

combinando-se as equações para o fluxo máximo (que ocorre com queda de pressão mínima na válvula) (2.42), a equação (2.41) e a equação (2.34), e levando-se em consideração que o ganho do processo é dado por

$$G = \frac{dQ}{du} = \frac{dQ}{dx} \frac{dx}{du} \quad (2.43)$$

obtem-se que  $G$  é

$$G = \frac{d}{dx} \left( \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{1}{f(x)^2} - 1 \right) \frac{\Delta p_{\text{mín}}}{\Delta p_{\text{máx}}}}} \right) C_v \sqrt{\frac{\Delta p_{\text{mín}}}{D}} K_h \quad (2.44)$$

$C_v$  é o coeficiente de fluxo da válvula,  $\Delta p$  é a queda de pressão na válvula,  $D$  é a densidade específica do fluido – relação entre a densidade do fluido e a densidade da água ( $\rho_{\text{fluido}}/\rho_{\text{água}}$ ) – e  $f(x)$  é a característica inerente, que depende da válvula, podendo ser qualquer uma das equações (2.27) a (2.31). Considera-se que  $x = K_h u$ , sendo  $x$  a posição da haste da válvula ( $x \in [0;1]$ ),  $K_h$  uma constante de proporcionalidade e  $u$  é o sinal de controle.

## 2.5 COMPARAÇÃO DO MODELO DE FLUXO COM MALHAS REAIS

Vários testes foram realizados em malhas de fluxo<sup>15</sup> pertencentes a planta industrial da RIOCELL. Os resultados apresentaram curvas cujas formas são semelhantes para as diversas malhas. Essas curvas, se caracterizam por uma ausência de resposta nos primeiros décimos de segundo e um rápido crescimento logo em seguida. Para avaliar o modelo, foram comparadas as respostas em malha aberta dos testes reais com as respostas do modelo aproximado da equação (2.40), utilizando-se os parâmetros obtidos nos testes de reconhecimento. Observou-se, visualmente, que as respostas do modelo, através de simulações, representam com excelente fidelidade as respostas dos testes realizados em malhas industriais de fluxo.

Na Figura 10 e na Figura 11, apresentam-se as curvas obtida em dois desses testes de malha aberta juntamente com a curva, obtida através de simulação, de um teste equivalente mas utilizando o modelo de 1ª ordem com atraso, com os valores de  $G$ ,  $L$  e  $\tau$  encontrados pelo teste real. Em ambos os casos, o degrau para o teste de malha aberta foi aplicado em  $t=0$ , tanto no teste real como na simulação. Para a Figura 10, o degrau aplicado na entrada de controle, no teste real, foi de 5% (35% para 40%) e os valores encontrados para o modelo foram:

$$G = 0,88ml / \%$$

$$L = 1,86s$$

$$\tau = 2,39s$$

Para a Figura 11, cujo teste foi realizado em outra malha, o degrau na entrada de controle foi de 5% (40% para 45%) e os valores para o modelo foram:

$$G = 12,36ml / \%$$

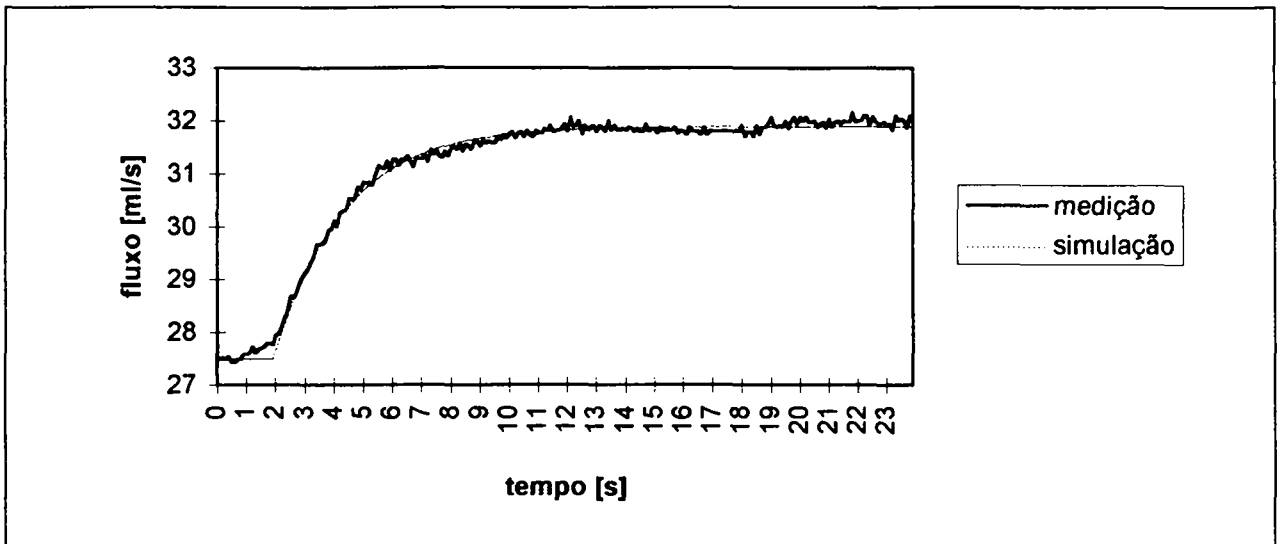
$$L = 0,71s$$

$$\tau = 0,95s$$

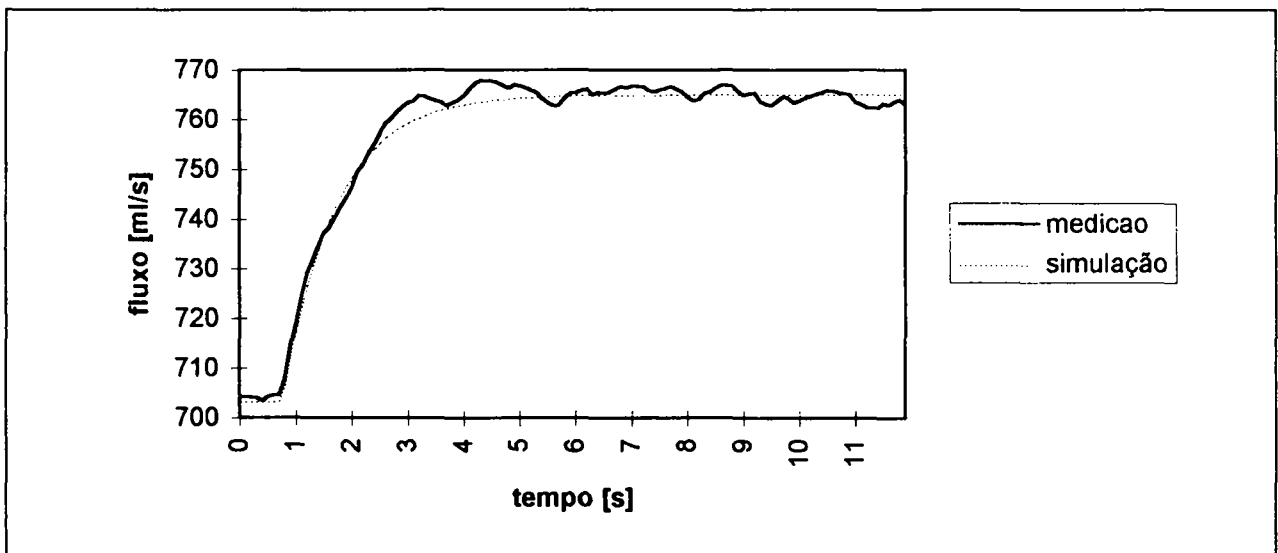
---

<sup>15</sup> Nos próximos capítulos, o teste de reconhecimento de malha aberta e os processo de fluxo aqui citados serão apresentados com maiores informações.





**Figura 10 - Comparação da curva de um processo real (451FICA-172<sup>16</sup>) com a curva obtida através de simulação do modelo do processo.**



**Figura 11 - Comparação da curva de um processo real (451FICA-036) com a curva obtida através de simulação do modelo do processo.**

<sup>16</sup> 451 é o código da planta a qual esta malha pertence, que no caso é a planta de cloro-soda. As letras de identificação indicam as funções incorporadas a malha ("Flow Indicate Control Alarm" - Alarme, Controle, Indicador de Fluxo), e o número que as seguem especificam a malha dentro da planta. No anexo 2, apresentam-se as características das malhas de controle referenciadas neste trabalho (inclusive esta).

## 2.6 CONCLUSÃO

Neste capítulo foram analisadas todas as características das malhas de fluxo que são relevantes para o controle das mesmas. Em função dessas características, foi proposto um modelo para representar matematicamente o comportamento dinâmico. Esse modelo possui uma dinâmica de 1ª ordem e um atraso puro. O valor desse atraso não é variável, e a constante de tempo, embora possa apresentar uma pequena diferença de um ponto de operação para outro, também pode ser considerada constante, sendo o seu valor próximo ao da constante de tempo da válvula. Já o ganho, pode apresentar, e em geral apresenta, variação considerável com o ponto de operação, sendo dependente de muitos fatores, e por isso, impossível de ser generalizado mesmo que de uma forma qualitativa.

No final, foi feita uma comparação da resposta desse modelo, com a resposta para mudança do tipo degrau em malhas industriais de fluxo, comprovando-se que o modelo representa com grande fidelidade esse tipo de teste. Este modelo será utilizado no próximo capítulo para formular uma proposta de ajuste automático de controladores para malhas de fluxo.

Existe ainda uma característica inerente às malhas de fluxo, que influirá inclusive no tipo de controlador utilizado, que é o forte ruído associado à medição de fluxo. Esse ruído, que tem origem na turbulência existente no movimento do fluido, principalmente na proximidade de obstruções, exige a utilização de um filtro do tipo passa-baixa para atenuar as componentes de alta frequência do sinal de medição.

## **CAPÍTULO 3**

# **AJUSTE AUTOMÁTICO DE CONTROLADORES PI PARA PROCESSOS DE FLUXO**

### **3.1 INTRODUÇÃO**

Embora existam muitas propostas de ajuste automático de controladores PID, apenas algumas delas são projetadas visando o controle de algum tipo de processo específico. Neste capítulo, será apresentado um ajuste automático elaborado especificamente para os processos de fluxo, aproveitando o fato de que esses processos possuem características comuns entre si.

Na próxima seção, será discutida a utilização de controladores PI no controle de malhas de fluxo. Será discutido também, qual é o desempenho (qualitativo) apropriado, em malha fechada, para este tipo de processo, para a partir daí, definir uma especificação quantitativa. Na seção 3.3, será explicada a metodologia utilizada na obtenção do ajuste automático, em função das características quantitativas de desempenho apresentadas e também do modelo para processos de fluxo obtido no capítulo 2. Na seção 3.4 serão feitas algumas considerações sobre a aplicação do ajuste automático, e a seção 3.5 será dedicada à avaliação deste ajuste em condições diferentes das utilizadas durante a obtenção do mesmo.

### **3.2 DESEMPENHO EM MALHA FECHADA PARA PROCESSOS DE FLUXO**

Como se sabe, os controladores PID são os mais utilizados em indústrias de processos. Para os processos de fluxo, a diferença é que a ação derivativa normalmente não é utilizada, pois o forte ruído existente na medição, originada pela turbulência do movimento, especialmente nas proximidades de obstruções, impede a sua utilização (Shinskey, 1988, p. 80), podendo-se

verificar isso facilmente ao tentar-se utilizar a ação derivativa no controle desses processos. De fato, na prática, pode-se comprovar essa preferência por controladores PI ao analisar-se os controladores em malhas de fluxo numa sala de controle.

Através da experiência adquirida com operadores de planta da empresa RIOCELL, observou-se que não existe, a princípio, uma especificação precisa e predefinida sobre o desempenho das malhas sob controle, inclusive para as de fluxo. Por outro lado, pode-se notar, em geral, que duas características são desejáveis, em especial para este tipo de malha:

- erro nulo em regime permanente (obtido com a ação integral);
- respostas amortecidas (sobreamortecidas ou pouco oscilatórias).

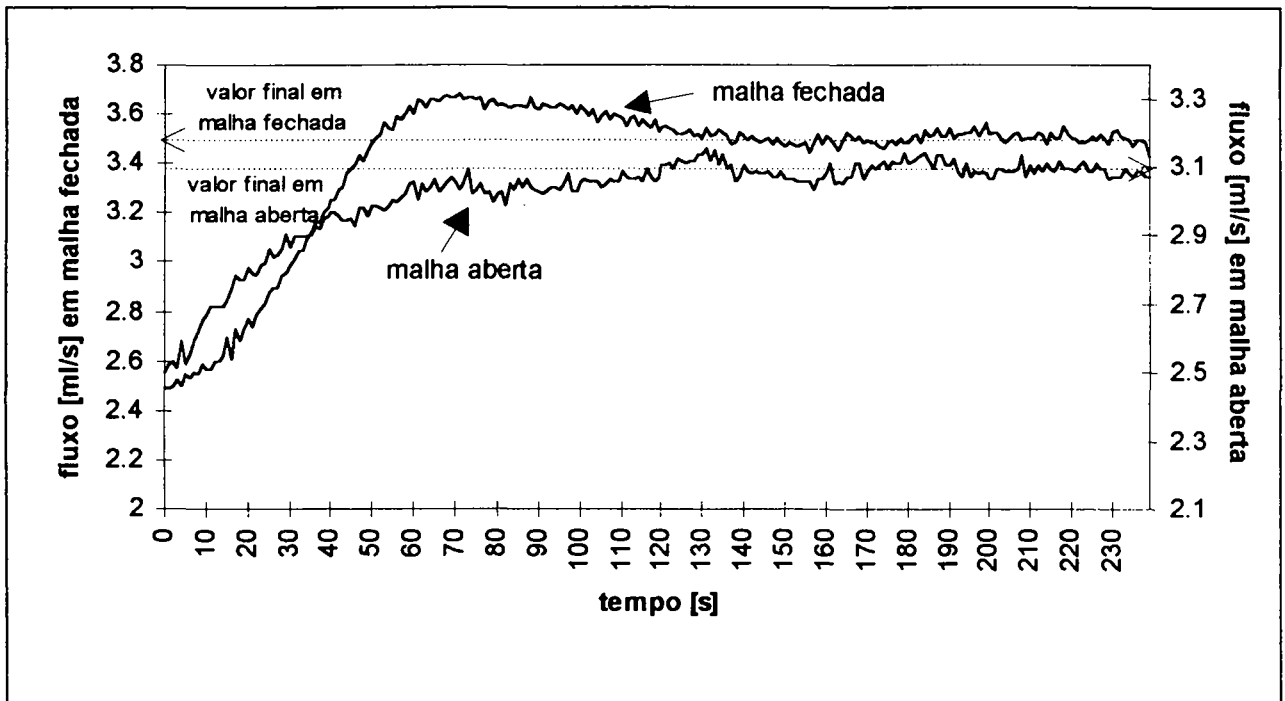
Também observou-se que não existe nenhuma exigência para que as respostas desse tipo de malha aproximem-se daquelas que são consideradas como perfeitas, ou seja, repostas instantâneas e sem erro nas mudanças de referência. Isso é explicado, em parte, pelo fato de que as malhas de fluxo são muito rápidas (respostas da ordem de poucos segundos quando sujeitas a alguma excitação), quando comparadas às demais malhas existentes numa indústria com processos contínuos, que possuem respostas da ordem de minutos ou até horas, e, por isso, qualquer desvio transitório de algum fluxo, em relação à sua referência, é normalmente absorvido ao longo da unidade de processamento à qual este pertence. Além disso, como foi visto no capítulo 2, existem várias características não-lineares numa malha de fluxo que acabam prejudicando a estabilidade em malha fechada, desencorajando a utilização de parâmetros que conduzam a respostas muito rápidas.

Na Figura 12 e na Figura 13, apresentam-se comparações entre a resposta em malha aberta (perante uma mudança na abertura da válvula) com a resposta a uma mudança de referência em malha fechada, esta última obtida com os ajustes (em controladores PI) implementados no sistema de controle da própria RIOCELL, pelos seus técnicos, em duas malhas de controle de fluxo da sua planta industrial<sup>17</sup>. Tanto a mudança de referência (em malha fechada) como a aplicação do degrau na entrada de controle do processo (em malha aberta), foram

---

<sup>17</sup> Estas malhas estão descritas no anexo 2.

executadas em  $t = 0$ . As respostas dos testes de malha aberta e de malha fechada estão numa mesma região de operação, embora não possuam exatamente os mesmos valores iniciais e finais da variável medida, sendo por isso, referenciados em escalas distintas nos gráficos (nos eixos verticais).

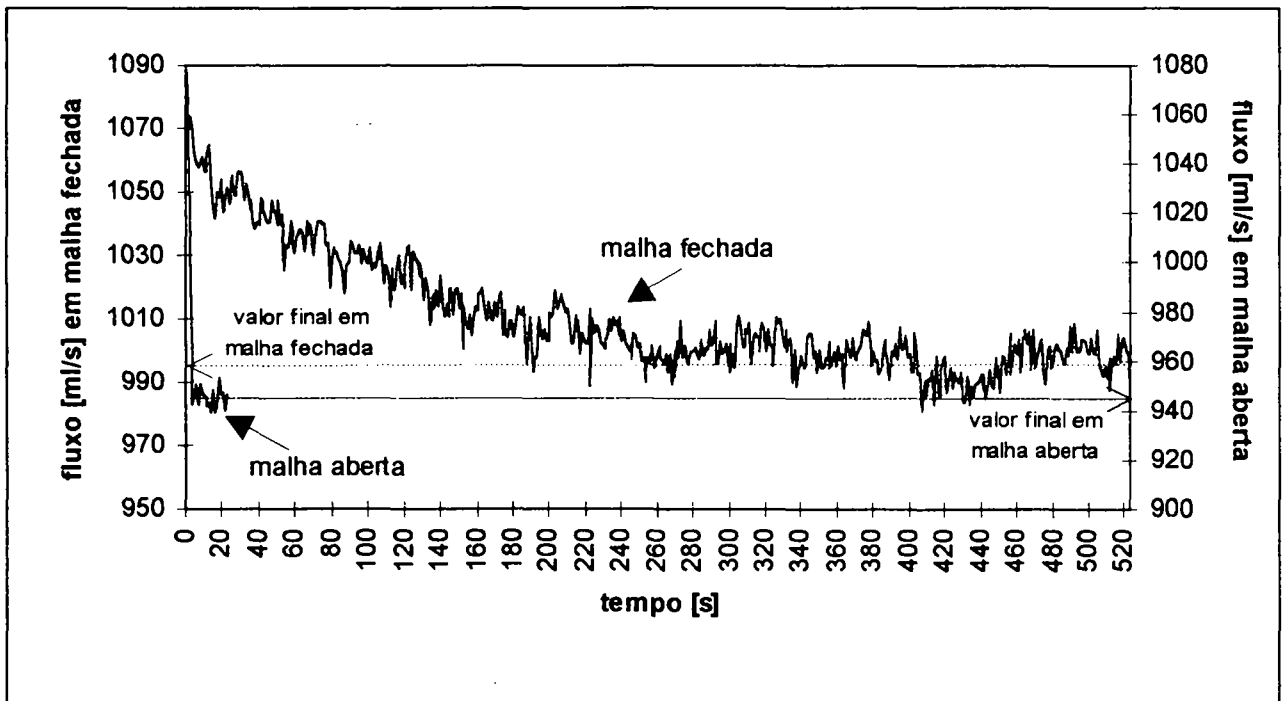


**Figura 12 - Comparação entre as respostas de malha aberta e de malha fechada (451FIC-139).**

A resposta em malha fechada da Figura 12 possui um tempo de estabilização muito próximo ao tempo de estabilização em malha aberta, com a diferença de que a primeira possui um pequeno sobrepasso. Já na malha da Figura 13, a resposta em malha fechada é sobreamortecida, e o tempo de resposta, neste caso, é muito maior do que o de malha aberta (aproximadamente 20 vezes maior), tanto que o teste em malha aberta foi encerrado com apenas 23s, pois a variável medida já havia estabilizado, e por isso, este teste, não possui pontos no restante do gráfico. Maiores informações sobre os parâmetros do controlador destas malhas pode ser encontradas no anexo 2.

A Figura 12 e a Figura 13 representam dois casos extremos encontrados nesses processos, sendo que o primeiro caso, cuja resposta possui uma velocidade semelhante à de malha aberta,

caracteriza o melhor ajuste. De uma maneira geral, pode-se comprovar que os ajustes realizados pelos técnicos da RIOCELL, nas malhas de fluxo, fornecem respostas de rejeição às perturbações ou para mudanças de referência que são equivalentes ou mais lentas do que a dinâmica em malha aberta. Em função desta observação, e optando pela melhor situação – que é aquela em que a velocidade de resposta de malha fechada se equivale à de malha aberta – será desenvolvida a metodologia de ajuste.



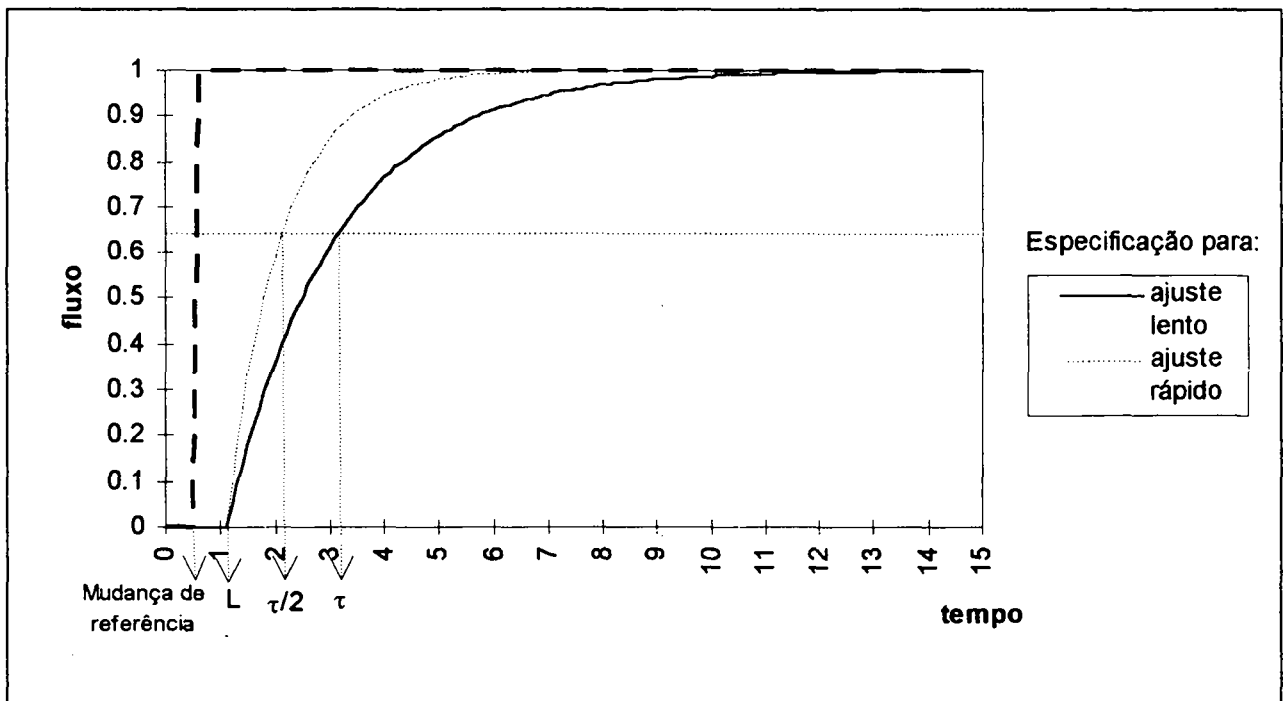
**Figura 13 - Comparação entre as respostas de malha aberta e de malha fechada (451FICQ-046).**

Para encontrar uma metodologia de ajuste, é necessário que o desempenho que foi colocado anteriormente, nesta seção, de uma maneira qualitativa, seja especificado quantitativamente. Por outro lado, para dar maior flexibilidade à proposta de ajuste automático, resolveu-se especificar dois objetivos de desempenho, em vez de apenas um. As especificações quantitativas de desempenho serão denominadas de *lenta* e *rápida*, sendo utilizadas para obter dois métodos de ajuste automático (*lento* e *rápido*). Elas estão apresentadas na Figura 14. O objetivo final dessas especificações de desempenho é servir como referência em malha fechada (conforme será descrito na próxima seção), auxiliando na obtenção dos ajustes automáticos, para

que estes forneçam respostas conservativas em malha fechada, proporcionando uma robustez maior para o controle.

1. Desempenho para o ajuste lento: especificou-se para a malha fechada, a mesma dinâmica de malha aberta, incluindo-se o atraso de transporte, ou seja, o objetivo em malha fechada é obter uma resposta amortecida que possua uma constante de tempo igual a de malha aberta.
2. Desempenho para o ajuste rápido: como o ajuste lento proposto é conservativo, especificou-se para a malha fechada, uma resposta amortecida que possua uma constante de tempo igual à metade da de malha aberta, objetivando-se atingir respostas mais rápidas.

Devido à exigência de desempenho moderada das malhas de fluxo, os controladores PI são apropriados para atingi-lo. Por isso, decidiu-se adotar controladores do tipo PI para esses processos, escolha esta que também é aconselhada por autores como Shinskey (1988, p. 80) e Buckley (p. 149), devido aos problemas com ruído.



**Figura 14 - Especificações para os ajustes lento e rápido.**

### 3.3 METODOLOGIA PARA OBTENÇÃO DO AJUSTE AUTOMÁTICO

Na seção anterior, definiu-se o desempenho a ser obtido com controladores PI em malhas de fluxo. Nesta seção, será apresentada a metodologia utilizada para encontrar equações de ajustes dos parâmetros do PI, tal que forneçam o desempenho desejado. Antes, porém, é necessário que seja definida uma técnica para determinação da dinâmica do processo, pois será em função dos parâmetros identificados para o modelo do processo que os ajustes do controlador serão calculados. Como os processos de fluxo possuem, em geral, uma característica dinâmica predominante de 1ª ordem (conforme o modelo capítulo 2), a determinação dos parâmetros do modelo da equação (2.40) (atraso com constante de tempo) pode ser obtida convenientemente por um teste de malha aberta (através da *curva de reação* do processo). Este teste será descrito no capítulo 4 (subseção 4.3).

Num estudo realizado por Bruciapaglia (1992, p. 35), são avaliados quatro métodos distintos, que utilizam um teste de malha aberta para a obtenção dos parâmetros  $G$ ,  $L$  e  $\tau$  do modelo. Avalia-se, no referido trabalho, o desvio transitório entre as respostas dos modelos e as respostas de um conjunto abrangente de processos com características diferentes, sendo que os parâmetros dos modelos são obtidos com testes de reconhecimento realizados nos processos. Os métodos avaliados foram propostos por Ziegler e Nichols (1942), Hägglund (1991), Smith C. L. (citado por Smith, C. A. & Corripio, 1985, p. 219-220) e Ohta *et al.* (citado por Nishikawa *et al.*, 1984, como método das áreas características). Como resultado desse estudo, Bruciapaglia conclui que o método de Ziegler e Nichols apresenta a maior variação transitória processo/modelo dentre todos, e os outros três apresentam desvios menores do que o de Ziegler e Nichols, mas equivalentes entre si. O método de Hägglund, contudo, apresenta o inconveniente de exigir o traçado de uma reta tangente à curva de reação do processo (assim como o de Ziegler e Nichols). Entre os dois últimos, será escolhido o método de Smith<sup>18</sup> por ser o mais simples de ser implementado. Este método, está descrito no capítulo 4 (subseção 4.5.1)

---

<sup>18</sup> Este método também é recomendado por Smith e Corripio (1985, p. 220) na obtenção de  $L$  e  $\tau$  a partir da curva de reação.



Após definido o método de identificação do processo, pode-se partir para a obtenção do ajuste automático, baseado em

- um modelo de 1ª ordem com atraso de transporte, com a função de transferência  $P(s)$  sendo dada por

$$P(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{G}{\tau s + 1} e^{-sL} \quad (3.1)$$

cujos parâmetros são:

$G$  → ganho do processo,

$L$  → atraso,

$\tau$  → constante de tempo.

O controle será realizado por

- um controlador PI,  $C(s)$ , onde

$$C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_c \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (3.2)$$

cujos parâmetros para ajuste são

$K_c$  → ganho proporcional,

$T_i$  → tempo integral,

As especificações de controle, conforme a subseção 3.2, possuem as seguintes respostas em malha fechada ( $M(s)$ ):

- ajuste lento:

$$M(s) = \frac{Y_m(s)}{Y_r(s)} = \frac{1}{\tau s + 1} e^{-sL} \quad (3.3)$$

- ajuste rápido:

$$M(s) = \frac{Y_m(s)}{Y_r(s)} = \frac{1}{\frac{\tau}{2}s + 1} e^{-sL} \quad (3.4)$$

Os valores de  $\tau$  e  $L$  são os próprios parâmetros do processo, e as variáveis nas equações anteriores são:

$Y_r(s) \rightarrow$  referência do processo,

$Y(s) \rightarrow$  resposta do processo,

$U(s) \rightarrow$  resposta do controlador,

$E(s) \rightarrow$  erro entre a referência e a saída do processo,

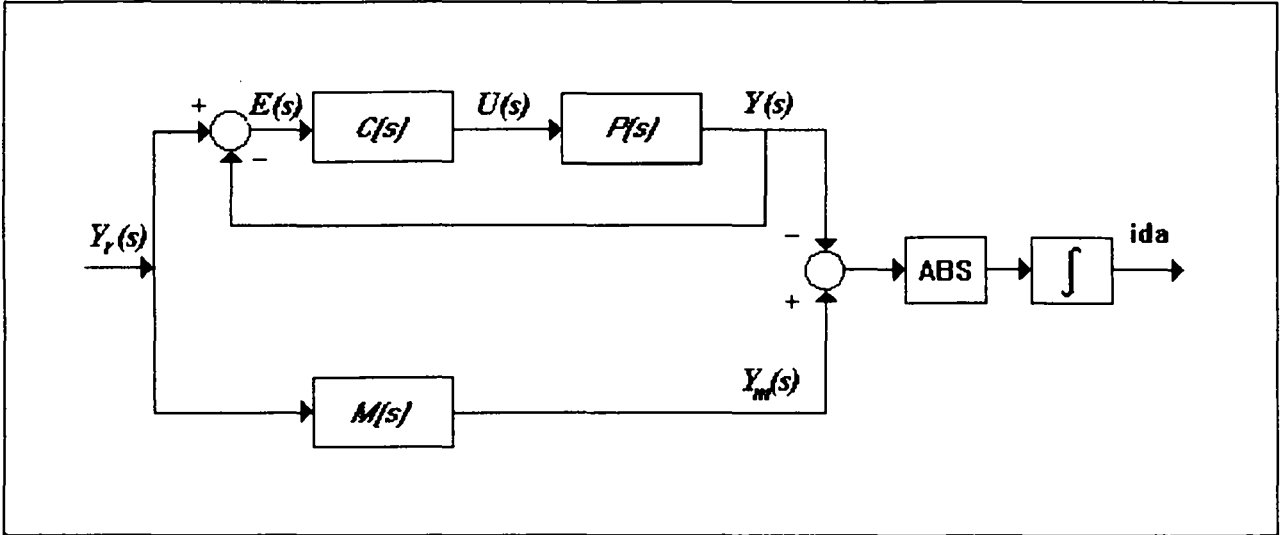
$Y_m(s) \rightarrow$  resposta do modelo de referência.

Para encontrar uma metodologia de ajuste automático que resulte nas especificações desejadas, resolveu-se minimizar o seguinte índice:

$$ida = \int_0^T |y_m(t) - y(t)| dt \quad (3.5)$$

Portanto, essa metodologia objetiva encontrar parâmetros para controladores PI, em função dos parâmetros  $G$ ,  $L$  e  $\tau$  do modelo do processo (obtidos com um teste de malha aberta), de maneira que a resposta do modelo, em malha fechada, fique o mais próxima possível da resposta de desempenho especificada. Isso será conseguido através da minimização da integral da diferença absoluta (*ida*) dessas duas respostas (do modelo sob controle e da resposta especificada para malha fechada), para mudanças de referência. Essa minimização foi obtida através de simulações. Para realizar as simulações, o sistema da Figura 15 foi implementado no simulador Simnon™, versão 3.0 (simulador de sistemas não-lineares)<sup>19</sup>.

<sup>19</sup> Marca registrada do *Department of Automatic Control*, Lund, Suécia (produto da *SSPA Systems*)



**Figura 15 - Sistema implementado no simulador.**

Antes de descrever o procedimento utilizado nas simulações, é interessante mostrar um desenvolvimento realizado para um caso particular do problema da minimização que foi colocado anteriormente. Este caso ocorre quando  $L = 0$ , e a minimização de  $ida$  pode ser encontrada facilmente de maneira analítica, utilizando-se, por exemplo, o método de *Síntese Direta* (Seborg , Edgard & Mellichamp, 1989, p. 273-276), que utiliza o modelo de um processo e uma resposta desejada em malha fechada para projetar o controlador. Esse caso, nada mais é do que um simples cancelamento do pólo do processo com o zero do controlador. Pode-se mostrar que para um modelo dado por

$$P(s) = \frac{G}{\tau s + 1} \quad (3.6)$$

e a função de transferência desejada, em malha fechada, por

$$\frac{Y(s)}{Y_r(s)} = \frac{1}{\tau_f s + 1} \quad (3.7)$$

onde  $\tau_f$  é um parâmetro de projeto (que define a constante de tempo em malha fechada), a função de transferência obtida para o controlador é

$$C(s) = \frac{\tau}{\tau_f G} \left( 1 + \frac{1}{\tau s} \right) \quad (3.8)$$

A equação (3.8) é a estrutura de um PI com os seguintes parâmetros:

$$K_c = \frac{\tau}{\tau_f G} \quad (3.9)$$

$$T_i = \tau \quad (3.10)$$

Se utilizar-se como parâmetro de projeto  $\tau_f = \tau$  e  $\tau_f = \tau/2$ , que são as especificações para o ajuste lento e rápido, respectivamente, obter-se-á:

1. ajuste lento  $K_c = 1/G$  e
2. ajuste rápido  $K_c = 2/G$

sendo o valor de  $T_i$  igual a  $\tau$  para ambos os casos. Estes são os ajustes que, para esse caso particular, tornam o valor de *ida* nulo para todo  $t$  (e portanto, minimizam-no). Para encontrar a minimização de *ida*, em função dos parâmetros do controlador, nos casos em que  $L \neq 0$ , foram realizadas simulações com o sistema da Figura 15. Estas simulações visaram encontrar equações para outros valores de  $L/\tau$ , semelhantes àsquelas encontradas para  $L = 0$  (ou seja  $L/\tau = 0$ ). Os parâmetros de  $L$  e  $\tau$  (do modelo do processo) utilizados nas simulações, foram escolhidos para resultar nas seguintes relações de  $L/\tau$ : 0,1 , 0,2 , 0,3 , 0,4 , 0,5 , 0,6 , 0,7 , 0,8 , 0,9 e 1,0. A escolha desses pontos baseou-se na experiência adquirida, pois as malhas de fluxo, em geral, possuirão relações de  $L/\tau$  dentro dessa faixa. A sequência de passos seguida foi:

1. Escolher um valor para  $\tau$ ,
2. Definir 10 valores apropriados de  $L$ , de tal maneira que as relações  $L/\tau$  obtidas se igualem aos valores predeterminados anteriormente (de 0,1 até 1,0).
3. Escolher uma região do plano  $K_c \times T_i$  , dentro da qual deve estar situado um par  $(K'_c, T'_i)$  que minimize *ida*. Este é um passo crítico do procedimento, e como ponto de partida foi utilizada uma região que englobava os parâmetros encontrados para a relação  $L/\tau$ , imediatamente anterior.
4. Definir valores de incremento  $\Delta K_c$  e  $\Delta T_i$  que deverão ser somados aos valores de  $K_c$  e  $T_i$  , respectivamente, para obter um número finito de pontos dentro da região.

5. Utilizando o valor de  $\tau$  definido no passo 1 e cada um dos valores de  $L$  definidos no passo 2, realizar simulações utilizando como ajuste do controlador, cada ponto  $(K_c, T_i)$  dentro da região escolhida nos dois passos anteriores, registrando-se em cada simulação com mesma relação  $L/\tau$ , o conjunto de parâmetros do controlador que resultou no menor valor de *ida*.
6. Repetir todos os passos anteriores para um novo valor de  $\tau$ .

A variação dos parâmetros de uma simulação para outra, foi executada de maneira automática (através dos recursos da linguagem do simulador utilizado), o que permitiu a realização de um grande número de simulações. Cada vez que se encerrava uma execução dos cinco primeiros passos, era obtida uma curva para  $K_c \times (L/\tau)$  e outra para  $T_i \times (L/\tau)$ , formada pelos valores dos ajustes do controlador que minimizaram *ida*. Após o término das simulações, e analisando-se todas as curvas  $K_c \times (L/\tau)$  e  $T_i \times (L/\tau)$  obtidas para cada sequência de simulações descrita acima, dois fatos importantes foram constatados:

- as curvas  $K_c \times (L/\tau)$  eram idênticas para valores de  $L/\tau$  iguais, independentemente dos valores individuais de  $L$  ou  $\tau$ ,
- as curvas  $T_i \times (L/\tau)$  possuíam valores diferentes para valores iguais de  $L/\tau$ , dependendo do valor de  $\tau$ . Entretanto, as suas curvaturas eram idênticas. Por isso, não foi difícil verificar matematicamente que, para uma mesma relação  $L/\tau$ , os valores de  $T_i$  encontrados eram diretamente proporcionais a  $\tau$ , ou seja

$$\frac{T_i|_{\tau_1}}{T_i|_{\tau_2}} = \frac{\tau_1}{\tau_2}, \text{ para uma mesma relação } L/\tau \quad (3.11)$$

onde  $\tau_1$  e  $\tau_2$  são dois valores quaisquer e distintos para a constante de tempo do processo.

Desse modo, os valores de  $T_i$  foram parametrizados em relação a  $\tau$ , através da obtenção das curvas  $\frac{T_i}{\tau} \times (L/\tau)$ . Depois, fez-se uma média em cada ponto  $L/\tau$  de todas essas curvas parametrizadas, obtendo-se uma única curva. Finalizando, aplicou-se então um método de

regressão linear a esta curva média, resultando na equação de uma reta. As curvas de  $K_c$  não precisaram ser parametrizadas, mas também foi feita uma média de todas elas em cada ponto  $L/\tau$  e foi obtida a equação de uma reta através de regressão linear.

Deve-se fazer uma referência quanto ao ganho do processo. Em todas as simulações, foi utilizado  $G = 1$ . Entretanto, um processo real pode possuir qualquer valor para o seu ganho, influenciando, portanto, o ganho do controlador. Isto é contornado pelo fato de que a resposta do sistema em malha fechada na parte superior da Figura 15 é dada por

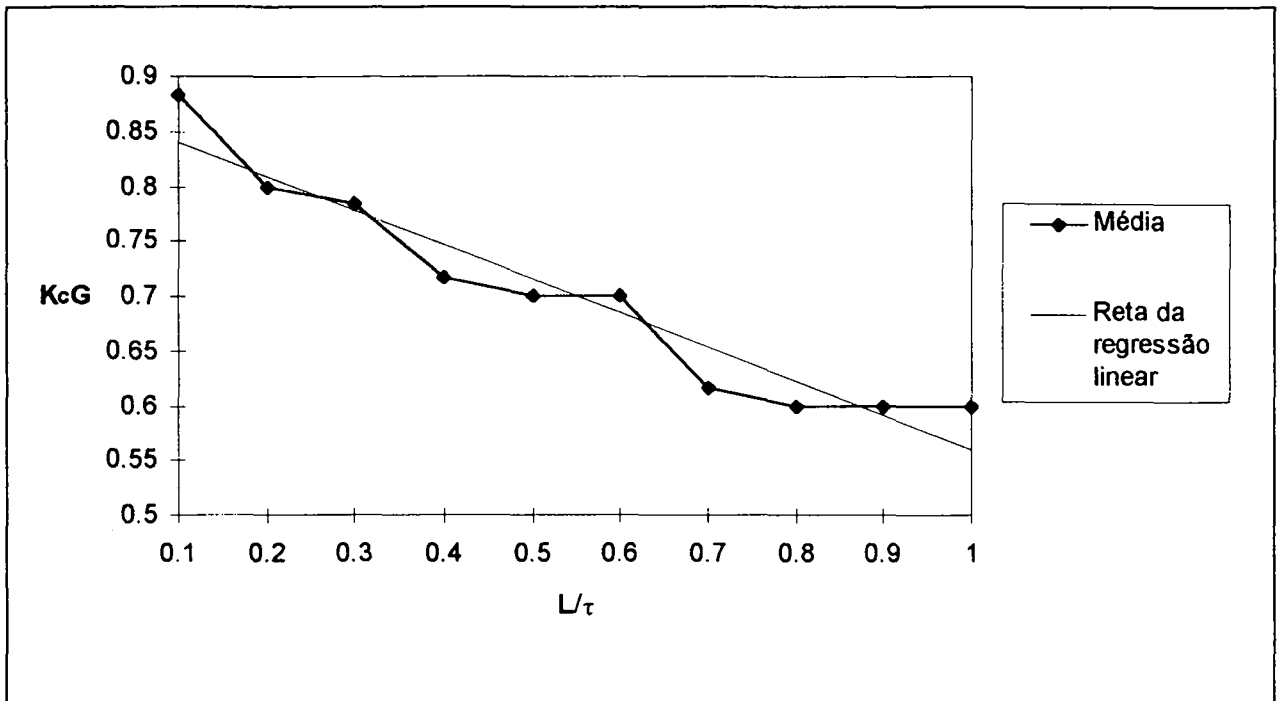
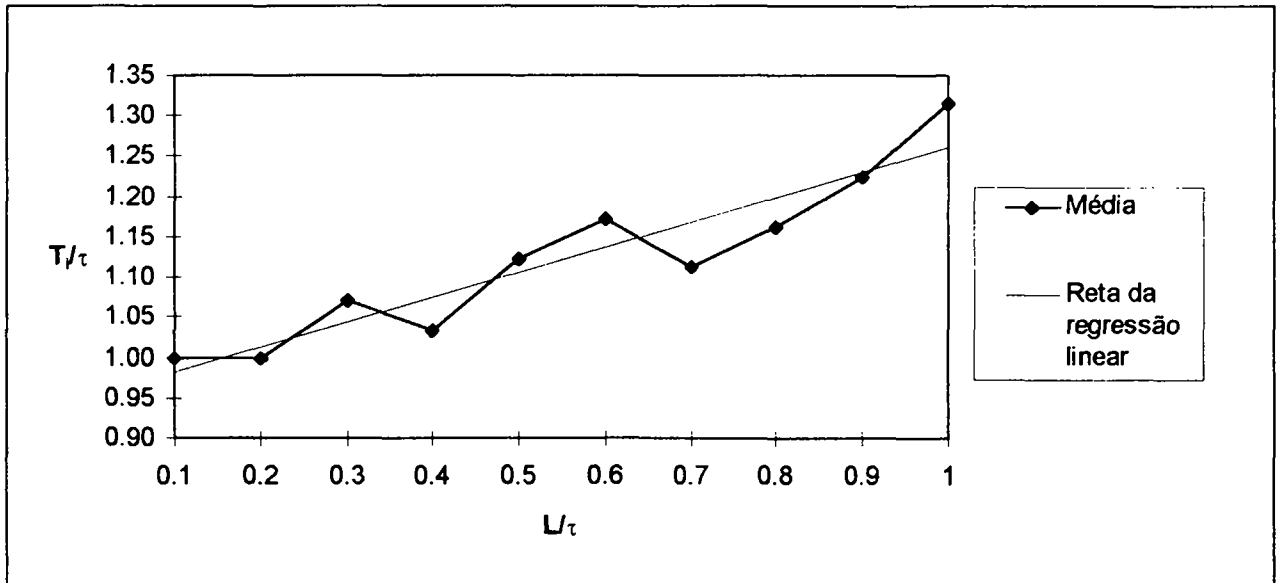
$$\frac{Y(s)}{Y_r(s)} = \frac{C(s)P(s)}{1 + C(s)P(s)} \quad (3.12)$$

Como o ganho do processo aparece multiplicando o ganho do controlador – no termo  $C(s)P(s)$  – tanto no numerador como no denominador da resposta em malha fechada, a modificação na resposta que seria introduzida devido a um ganho do processo diferente de 1 pode ser anulada conservando-se o mesmo valor de  $K_c G$  que foi obtido no resultado da simulação, pois neste caso, a função de transferência do processo controlado em malha fechada dado pela equação (3.12) seria independente do ganho do processo. Como  $G|_{\text{simulação}} = 1$ , então  $(K_c G)|_{\text{simulação}} = K_c|_{\text{simulação}}$ , e portanto, como deve-se manter  $(K_c G)|_{\text{simulação}} = K_c G|_{\text{processo real}}$ , o valor final de  $K_c$  a ser utilizado deve ser

$$K_c = \frac{K_c|_{\text{simulação}}}{G|_{\text{processo real}}} \quad (3.13)$$

Dessa maneira, o comportamento do sistema em malha fechada é o mesmo para qualquer valor de  $G$  do processo.

As curvas, e respectivas retas de ajuste de  $K_c G \times (L/\tau)$  e  $\frac{T_i}{\tau} \times (L/\tau)$ , são apresentadas na Figura 16, na Figura 17, na Figura 18 e na Figura 19, as duas primeiras para o ajuste lento e as duas últimas para o ajuste rápido.

Figura 16 - Curvas de  $K_cG$  x  $L/\tau$  para o ajuste lento.Figura 17 - Curvas de  $T_i/\tau$  x  $L/\tau$  para o ajuste lento.

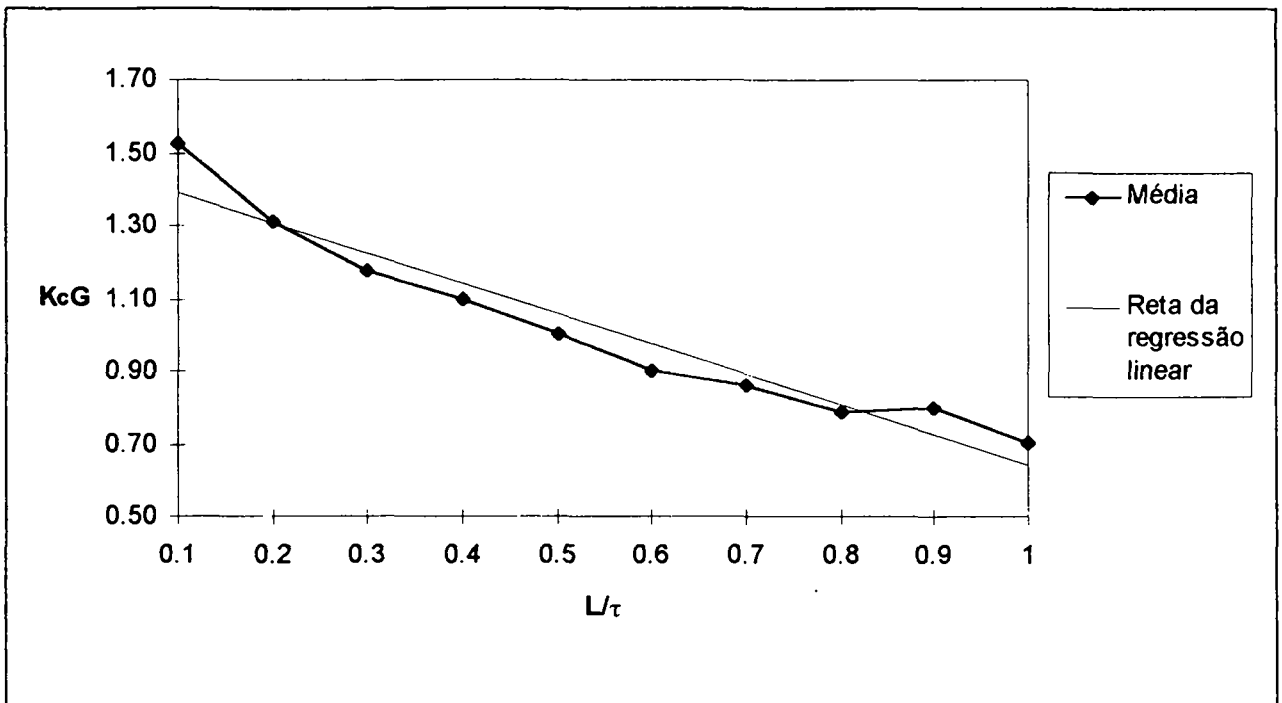


Figura 18 - Curvas de  $K_c G \times L/\tau$  para o ajuste rápido.

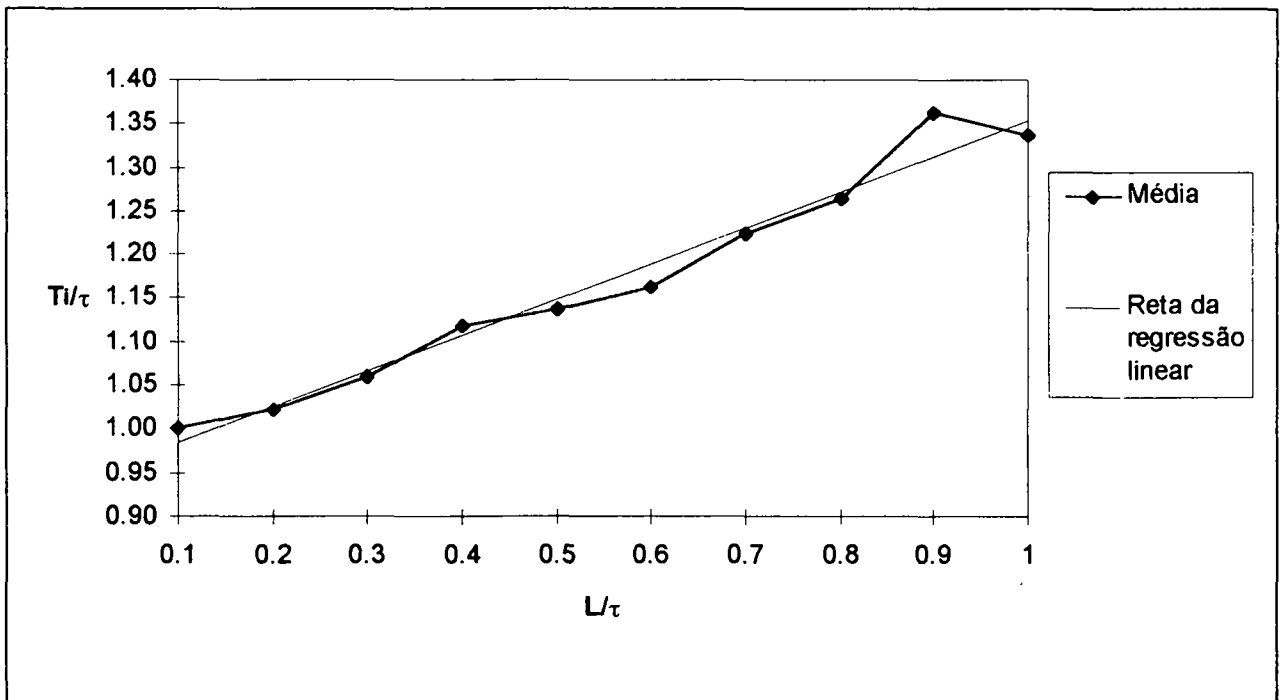


Figura 19 - Curvas de  $T_i/\tau \times L/\tau$  para o ajuste rápido.

É claro que todo o procedimento acima descrito, foi realizado usando como referência em malha fechada, primeiramente o modelo de referência para o desempenho lento e depois o modelo



de referência para o desempenho rápido. Como resultado final de todo esse procedimento, as equações de ajuste, obtidas com regressões lineares, para os métodos lento e rápido são:

#### Ajuste Lento

$$K_c = \frac{\left(-0,313 \frac{L}{\tau} + 0,8722\right)}{G} \quad (3.14)$$

$$T_i = 0,313L + 0,9492\tau \quad (3.15)$$

#### Ajuste Rápido

$$K_c = \frac{\left(-0,834 \frac{L}{\tau} + 1,475\right)}{G} \quad (3.16)$$

$$T_i = 0,411L + 0,9448\tau \quad (3.17)$$

### 3.4 O CASO DA RELAÇÃO $0 < L/\tau < 0,1$

Como já foi referido anteriormente, nos processos de fluxo, normalmente ocorrerá que  $0,1 < L/\tau < 1,0$ . Por isso, as regressões anteriores foram feitas para  $0,1 < L/\tau < 1,0$ , que também foi a faixa abrangida pelas simulações. Nesta região, as curvas foram muito bem ajustadas por retas. A situação na qual  $0 < L/\tau < 0,1$  poderá eventualmente ocorrer. Neste caso, existe uma discrepância dos valores fornecidos pelas equações de ajuste – (3.14) até (3.17) – em relação aos valores que minimizam *ida*, tanto maior na medida em que  $L/\tau \rightarrow 0$ .

Tome-se como exemplo a situação mais divergente, que ocorre quando  $L = 0$ . Na tabela 5, apresentam-se os valores que foram encontrados analiticamente para os ajustes lento e rápido, com aqueles obtidos com as equações (3.14) até (3.17):

AJUSTE LENTO		
	Método analítico	Equação de ajuste
$K_c$	$1/G$	$0,8722/G$
$T_i$	$\tau$	$0,9492\tau$
AJUSTE RÁPIDO		
	Método analítico	Equação de ajuste
$K_c$	$2/G$	$1,475/G$
$T_i$	$\tau$	$0,9426\tau$

**Tabela 5 - Comparação entre os parâmetros exatos e os parâmetros obtidos pelas fórmulas de ajuste para  $L=0$ .**

O valor de  $T_i$  dos ajustes lento e rápido obtido com as equações está bem próximo do valor exato, calculado analiticamente. Já o ganho proporcional do controlador apresenta diferenças mais acentuadas. Estas diferenças, podem ser bastante reduzidas através da utilização de uma equação logarítmica, obtida através de uma regressão do mesmo tipo, considerando-se todos os pontos compreendidos entre  $0 < L/\tau < 1,0$  da curva de  $K_c$ , o que resulta nas seguintes equações:

#### Ajuste Lento

$$K_c = \frac{\left[ -0,1731 \ln \left( 10 \frac{L}{\tau} + 1 \right) + 1,0027 \right]}{G} \quad (3.18)$$

#### Ajuste Rápido

$$K_c = \frac{\left[ -0,5163 \ln \left( 10 \frac{L}{\tau} + 1 \right) + 1,9271 \right]}{G} \quad (3.19)$$

Com essas equações, quando  $L = 0$ , e portanto  $L/\tau = 0$ , o valor do ganho proporcional do controlador é  $K_c = 1,0027/G$ , para ajuste lento, e  $K_c = 1,9271/G$ , para o ajuste rápido, que estão muito próximos daqueles calculados analiticamente e apresentados na segunda coluna da Tabela 5. Como os processos de fluxo normalmente possuirão uma relação  $L/\tau > 0,1$ , para efeito de

simplificação na implementação dos ajustes de  $K_c$ , serão utilizadas equações de retas para o cálculo deste parâmetro.

### 3.5 AVALIAÇÃO EM SIMULAÇÕES DO CONJUNTO IDENTIFICAÇÃO + AJUSTE + DESEMPENHO EM MALHA FECHADA

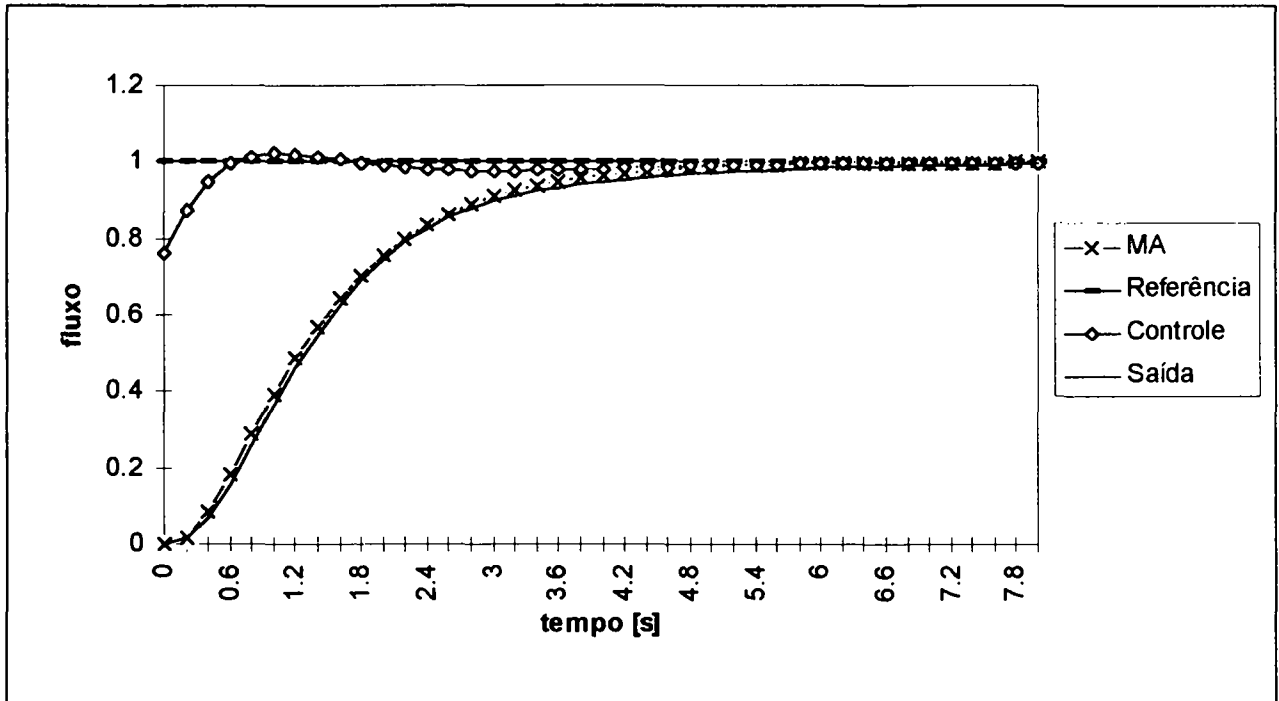
No capítulo 2, ao obter-se o modelo para processos de fluxo, aproximou-se toda a dinâmica desses processos por um modelo com um atraso de transporte e uma constante de tempo. Para avaliar a influência dessa aproximação no conjunto identificação/ajuste, e conseqüentemente no desempenho em malha fechada, obtido com o ajuste automático, realizaram-se algumas simulações utilizando-se uma função de transferência de 3ª ordem, que pode corresponder com maior fidelidade ao comportamento dos processos de fluxo. Para tanto, a partir da função de transferência

$$\frac{1}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)(\tau_3 s + 1)} \quad (3.20)$$

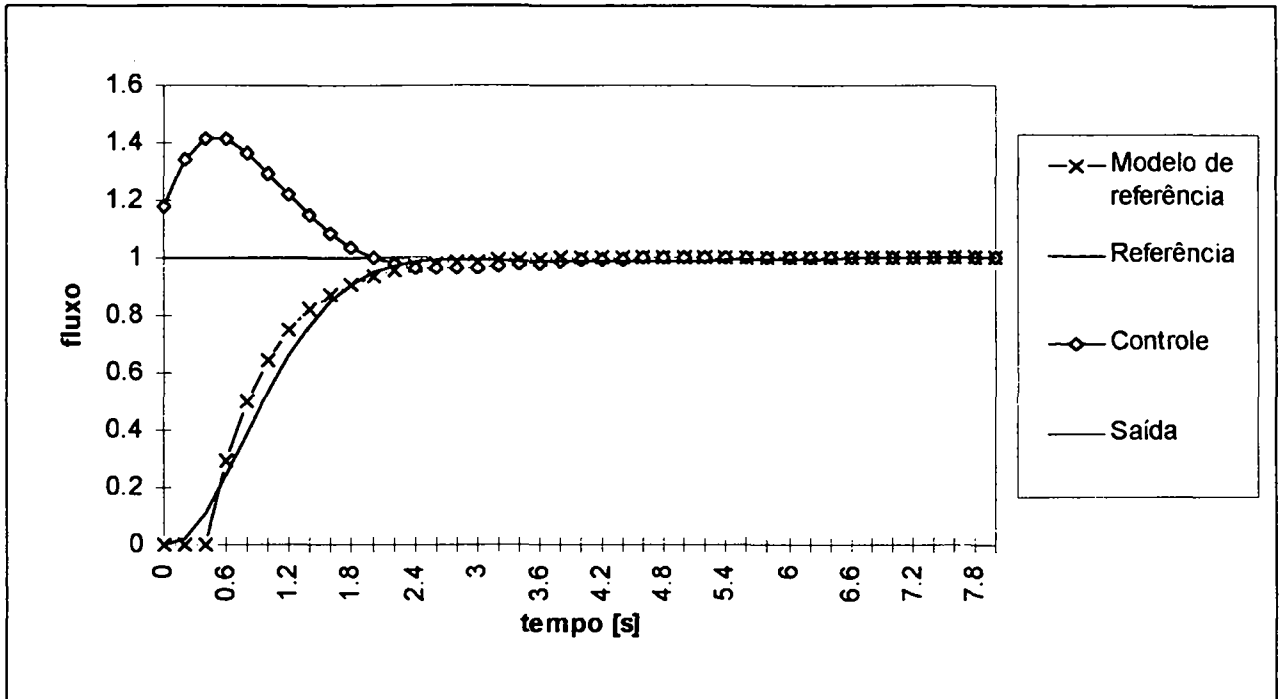
fixou-se  $\tau_1 = 0,1s$ , representando uma pequena constante de tempo fixa e variou-se as outras duas, sempre mantendo-se  $\tau_1 + \tau_2 \leq 0,5\tau_3$ , pois os processos de fluxo possuem uma característica dominante de 1ª ordem. Após definidos os valores das constantes de tempo, foram realizados reconhecimentos de malha aberta, com o método de Smith. As simulações de mudanças de referência, com o processo sendo controlado por um PI, com parâmetros fornecidos pelo ajuste automático, forneceram respostas muito próximas do desempenho desejado, que é a própria dinâmica em malha aberta, para o ajuste lento, e a metade da constante de tempo mais o atraso do modelo para o ajuste rápido.

Na Figura 20 e na Figura 21, apresentam-se as simulações para o caso em que  $\tau_2 = 0,4s$  e  $\tau_3 = 1,0s$ , e portanto  $\tau_1 + \tau_2 = 0,5\tau_3$ . Em  $t=0$ , foi aplicado tanto o degrau unitário na entrada do processo em malha aberta, como a mudança de referência unitária em malha fechada (“Referência” nos gráficos). Como o processo apresenta ganho unitário, a resposta em malha aberta (“MA” ou “Modelo de referência” nos gráficos) e o controle (“Controle”), apresentados nos gráficos, possuem valores finais igual a 1. A resposta em malha fechada foi denominada de

“Saída”. Dos casos analisados, este apresenta o desvio mais acentuado do processo em relação ao modelo, devido ao valor da soma das constantes de tempo menores ser elevado em relação à constante de tempo maior. Mesmo assim, a resposta do ajuste lento, em malha fechada, quase se sobrepõe à resposta de malha aberta e a velocidade do ajuste rápido em malha fechada é equivalente à velocidade da resposta especificada para o caso rápido.



**Figura 20 - Avaliação da influência da dinâmica do processo de 3ª ordem sobre o desempenho do ajuste automático (lento).**



**Figura 21 - Avaliação da influência da dinâmica do processo de 3ª ordem sobre o desempenho do ajuste automático (rápido).**

### 3.6 CONCLUSÃO

Neste capítulo, primeiramente descreveu-se um desempenho qualitativo para malhas de fluxo baseado na experiência passada através de operadores de planta e da observação dos ajustes de controladores, realizados por técnicos, e seus respectivos comportamentos em malha fechada em processos de fluxo na empresa RIOCELL. Para tornar a proposta mais flexível perante às inúmeras situações que podem surgir na prática, foram especificados de maneira quantitativa, dois desempenhos em malha fechada, denominados de lento e rápido.

Depois apresentou-se um método implementado em simulador, para que se traduzisse as especificações de desempenho em equações matemáticas que relacionam os parâmetros do controlador com os parâmetros do processo (obtidos com um reconhecimento de malha aberta). Essas equações foram obtidas, numa etapa final, através de análise de regressão linear. Para o caso mais comum em processos de fluxo, ou seja  $0,1 < L/\tau < 1,0$ , as relações empíricas de  $K_c \times (L/\tau)$  e  $T_i \times (L/\tau)$  foram muito bem ajustadas por retas. Por outro lado, quando é considerada a faixa  $0 < L/\tau < 1,0$ , poderiam ser utilizadas equações logarítmicas para o ajuste de

$K_c$  (o que não foi adotado neste trabalho por questão de simplificação na implementação do ajuste automático).

No final deste capítulo, foi feita uma descrição de alguns casos analisados através de simulações, para avaliar o efeito que uma dinâmica do processo, diferente da dinâmica do modelo considerado na obtenção do ajuste automático, exerce no desempenho deste último. Verificou-se que existe uma pequena diferença entre as respostas obtidas em malha fechada, com relação à especificação de desempenho, mais acentuada para o ajuste rápido, mas que não chega a comprometer o desempenho almejado pela especificação.

No próximo capítulo serão descritos os equipamentos (*software* e *hardware*) que foram adquiridos, e em parte desenvolvidos, para possibilitar a realização de testes em um processo de laboratório e em processos industriais de fluxo, assim como os métodos utilizados durante esses ensaios.

## CAPÍTULO 4

# METODOLOGIA E EQUIPAMENTOS DE TESTE

### 4.1 INTRODUÇÃO

Pela característica prática deste trabalho, foi necessário realizar levantamentos de dados e informações sobre processos industriais de fluxo, e também testar e avaliar métodos de ajuste automático de controladores, num processo de laboratório e na indústria (ver capítulo 5). Para tanto, especificaram-se, adquiriram-se e implementaram-se vários recursos que viabilizaram alcançar os objetivos previamente traçados. Este capítulo será dedicado, primeiramente, à descrição do sistema de controle utilizado em grande parte da empresa RIOCELL. Depois, à descrição dos equipamentos, compostos por *hardware* e *software*, utilizados durante a realização deste trabalho. Além dos recursos, serão descritos os procedimentos que possibilitaram a realização, com segurança, de testes numa planta industrial.

Uma outra questão abordada, que também foi utilizada como um meio durante este desenvolvimento, está relacionada com o método de identificação da dinâmica do processo, realizado através de um teste em malha aberta no processo. Na última seção será descrito o método implementado para a identificação do atraso de transporte efetivo, e da constante de tempo equivalente dos processos.

### 4.2 SISTEMA DE CONTROLE UTILIZADO PELA RIOCELL

Grande parte da planta industrial da RIOCELL é controlada por três SDCCD (Sistema Digital de Controle Distribuído) (vide anexo 3), fornecido pela empresa ABB (Asea Brown)

---

Boveri)<sup>20</sup>. Esse equipamento possui todos os recursos (analógicos e digitais) de *hardware* e *software* necessários para realizar o gerenciamento, supervisão, coordenação, controle, monitoração, intertravamento e seqüenciamento dos processos que a ele estiverem conectados. Ele é constituído de três tipos principais de módulos, a saber:

- *Master Gate (MG)*: unidade responsável pela comunicação;
- *Master View (MV)*: interface homem/máquina do SDCD;
- *Master Piece (MP)*: unidade de processamento (onde são executados os algoritmos de controle, por exemplo);

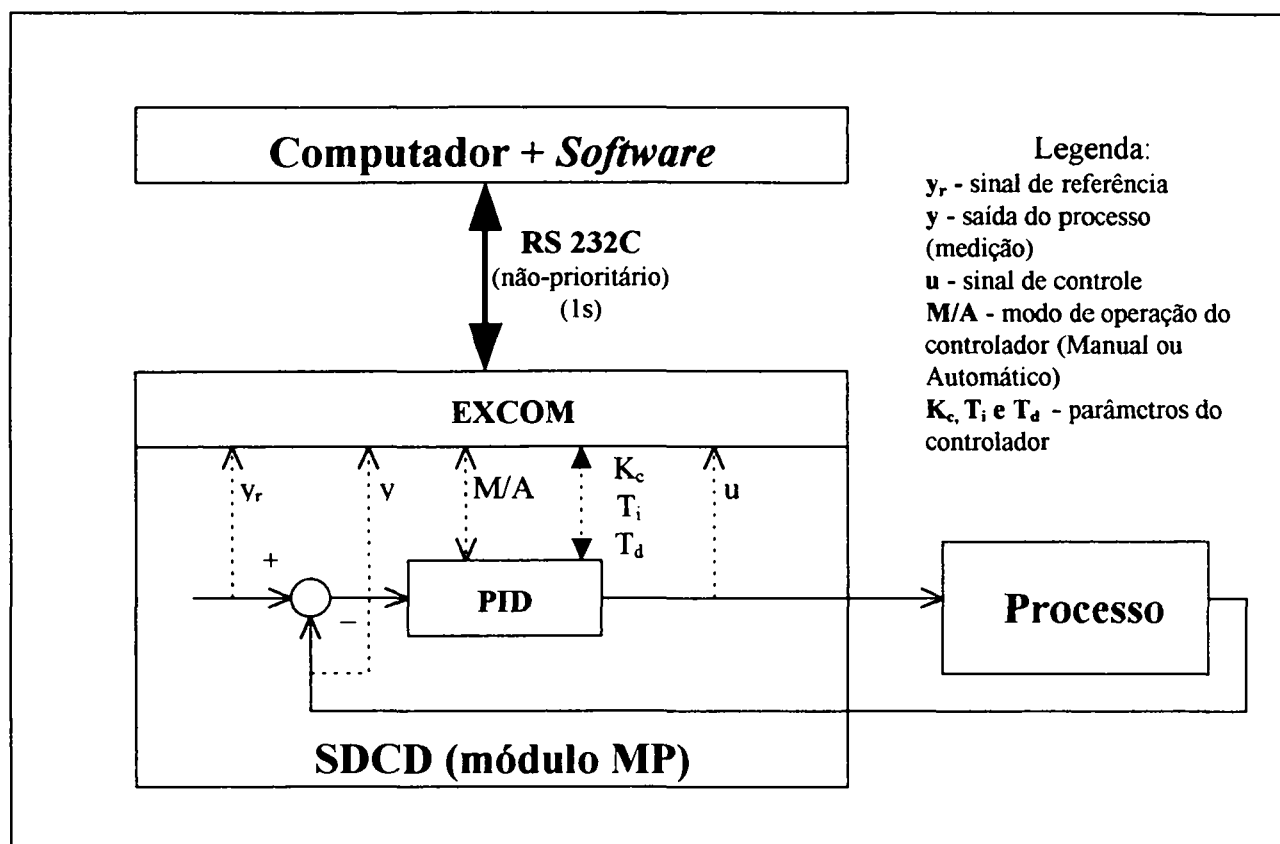
Como cada um desses módulos possui um limite de capacidade de execução de suas tarefas, eles são configurados de acordo com o tamanho da planta sob controle: quanto maior a planta, mais módulos são necessários, podendo-se expandir o sistema de controle gradualmente.

Entre vários recursos oferecidos por esse sistema, existe a possibilidade de comunicação entre o SDCD e um equipamento externo, através de uma porta de comunicação serial denominada de EXCOM, permitindo que o equipamento externo leia e escreva informações na base de dados do SDCD. Essa comunicação ocorre de maneira assíncrona, com interface RS232C. No início deste trabalho, cogitou-se a possibilidade de utilizar-se essa porta de comunicação para a realização de testes. Assim, um *software* de controle (descrito na seção 4.4) foi adaptado para realizar a comunicação com a EXCOM, cujo esquema de fluxo de informações é apresentado na Figura 22, onde também está representada uma malha de controle do SDCD.

---

<sup>20</sup> A empresa ABB atua em diversos ramos da engenharia elétrica, principalmente aqueles relacionados com a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Atua também em áreas como eletrônica de potência, instrumentação e controle industriais, edificação, irrigação, mineração, transporte por meios movidos a energia elétrica e até mesmo financiamento de grandes projetos. Ela é uma multinacional sueca-suíça, presente em 147 países em todo o mundo, inclusive no Brasil, e emprega, no total, cerca de 200 mil pessoas.





**Figura 22 - Sistema de comunicação com o SDCD via EXCOM.**

Alguns inconvenientes foram constatados durante esses ensaios:

1. o intervalo mínimo de amostragem era de 1s, inviabilizando reconhecimento (ver seção 4.5) de processos rápidos, como por exemplo, quase todos os processos de fluxo;
2. não era possível realizar o controle em malha fechada através do computador externo (o algoritmo de controle era executado pelo próprio SDCD), pois os dados do processo estavam disponíveis somente para leitura;
3. a comunicação não era prioritária, o que resultava na queda de comunicação repentina, por períodos indeterminados, sempre que outras funções prioritárias sobrecarregassem o processamento do SDCD.

Esses problemas obrigaram a utilização de outros meios, que fornecessem mais flexibilidade na condução de experimentos na planta, conforme está descrito nas duas próximas seções.

### 4.3 O *HARDWARE*

Para que se possa controlar, ou simplesmente atuar nos processos, necessita-se de algum tipo de *hardware*, de preferência com aquisição digital de dados, para que os mesmos sejam facilmente armazenados para posterior análise e documentação dos ensaios. Além disso, os sistemas digitais são muito mais flexíveis e fáceis de serem reconfigurados (para uma mudança no algoritmo de controle, por exemplo) do que os sistemas de controle analógicos.

Por isso, optou-se por um sistema de aquisição de dados, formado por um microcomputador e uma placa de aquisição de dados com conversores A/D e D/A. Devido ao problema da distância entre esta universidade e a planta industrial da RIOCELL, que exigia deslocamentos, esse sistema deveria ser portátil. Com os recursos existentes e com o que a tecnologia oferecia, foram adquiridos um microcomputador do tipo *notebook* e uma placa de aquisição de dados projetada especialmente para ser utilizada com computadores portáteis, pois é conectada ao computador através da porta paralela do mesmo, ao invés de necessitar de “*slot*” no barramento (que não é disponível nesse tipo de microcomputador), como outros produtos equivalentes. As principais características técnicas desses dois equipamentos são:

- MICROCOMPUTADOR: marca EPSON®, modelo ActionNote™500C, plataforma PC com processador 80486SLC2-50 e coprocessador numérico, 50 MHz de *clock*, 8MB de memória RAM.
- PLACA DE AQUISIÇÃO: marca Iotech®, modelo DaqBook/100™, 8 entradas diferenciais ou 16 entradas comuns com ganhos programáveis, conversor A/D de 12 bits e 100 KHz de varredura, dois conversores D/A de 12 bits configuráveis entre 0 e 5V CC.

Para a realização de testes com o processo de laboratório, esses dois equipamentos são suficientes, pois esse processo possui conversores incluídos na sua instrumentação, que permitem uma conexão adequada entre o processo e o sistema de aquisição. Contudo, na RIOCELL, existiam dois problemas de ordem técnica.

- O primeiro deles era a compatibilidade entre os sinais elétricos utilizados pela instrumentação de campo (sinais de corrente entre 4-20 mA) e aqueles utilizados pelo

sistema de aquisição (sinais de tensão). Para converter o sinal de corrente em tensão (para a leitura no conversor A/D), um simples resistor resolveu o problema. Já a conversão de sinais de tensão para corrente (necessária durante a atuação no processo através do conversor D/A), exige a utilização de circuitos ativos mais elaborados, mas ainda assim, disponíveis no mercado.

- O segundo problema, é a existência de dois sistemas distintos de aterramento, um localizado junto a instrumentação de campo, e o outro localizado na sala de controle, distantes mais de 100m um do outro. Como se sabe, dois pontos de aterramento dificilmente estão no mesmo potencial e mesmo em distâncias bem menores do que essa, valores altos de diferenças de potencial podem ser registrados em alguns casos (Lipták, 1985, p. 773). Esse problema ocasiona o surgimento de uma corrente em série com o sinal medido, nos condutores do sinal, fechando o circuito entre os terras (denominado de *laço de terra*). Esse laço de terra, gera um nível de ruído que pode inutilizar os sinais de leitura ou controle, e pode até mesmo causar danos na placa de aquisição devido à diferença de potencial. São ainda susceptíveis a campos magnéticos (Ott, 1976, p. 54). Esse problema, pode ser resolvido através da utilização de circuitos de isolamento (transformadores isoladores ou opto-acopladores) no circuito dos sinais, pois eles interrompem o laço de terra (Ott, p. 71).

Assim, a própria RIOCELL forneceu dois equipamentos, que resolveram esses problemas.

São eles:

- ISOLADOR DE SINAL: marca ICI, modelo MD701, 4-20mA/4-20mA (utilizado antes do conversor A/D);
- CONVERSOR DE SINAL: marca Engistrel®, modelo 201MV31100, 0-60mV/4-20mA (utilizado após o conversor D/A), que inclui também um isolador.

Ambos os equipamentos servem como isoladores, e o último ainda converte o sinal de saída do conversor D/A de tensão para corrente. Na Figura 23, pode ser visto um esquema de como os equipamentos foram ligados.

Observe-se que os conversores A/D do SDCCD e do sistema de aquisição, foram ligados em série no circuito do sinal de medição do campo, pois desta maneira, os operadores, por questão de segurança, continuariam com a leitura durante os testes, embora nem sempre tivessem o controle. Antes do conversor da placa, introduziu-se um filtro RC (passa-baixa), pois o sinal dos transmissores não são convenientemente filtrados. Na atuação sobre o processo, utilizou-se uma ligação em paralelo entre o conversor D/A do SDCCD e do sistema de aquisição. Como os dois não podem atuar simultaneamente, colocou-se uma chave para selecionar-se entre um e outro. Desta maneira, caso ocorresse algum problema com o sistema de aquisição, bastaria alterar a chave para o SDCCD, para que os operadores tornassem a controlar o processo normalmente.

As malhas selecionadas para testes foram indicadas pelos próprios operadores, evitando-se aquelas mais críticas para a operação de todo o processo. Mesmo com as precauções acima citadas, existiam dois inconvenientes para a operação das malhas, no momento da inserção do sistema de aquisição.

1. O primeiro ocorria ao ligar-se a leitura, pois durante essa operação, nem o SDCCD nem o sistema de aquisição possuíam leitura, e portanto, o processo permanecia sem controle nesse momento.
2. O segundo problema, ao ligar-se a atuação, pois nesse momento, o sinal de controle era desconectado e a válvula permanecia totalmente aberta ou totalmente fechada, dependendo do seu tipo.

Embora essas ligações levassem pouco tempo para serem concluídas, 1 ou 2 minutos cada uma (se tudo corresse bem), elas também constituíram-se como fatores limitantes durante a seleção das malhas para testes.

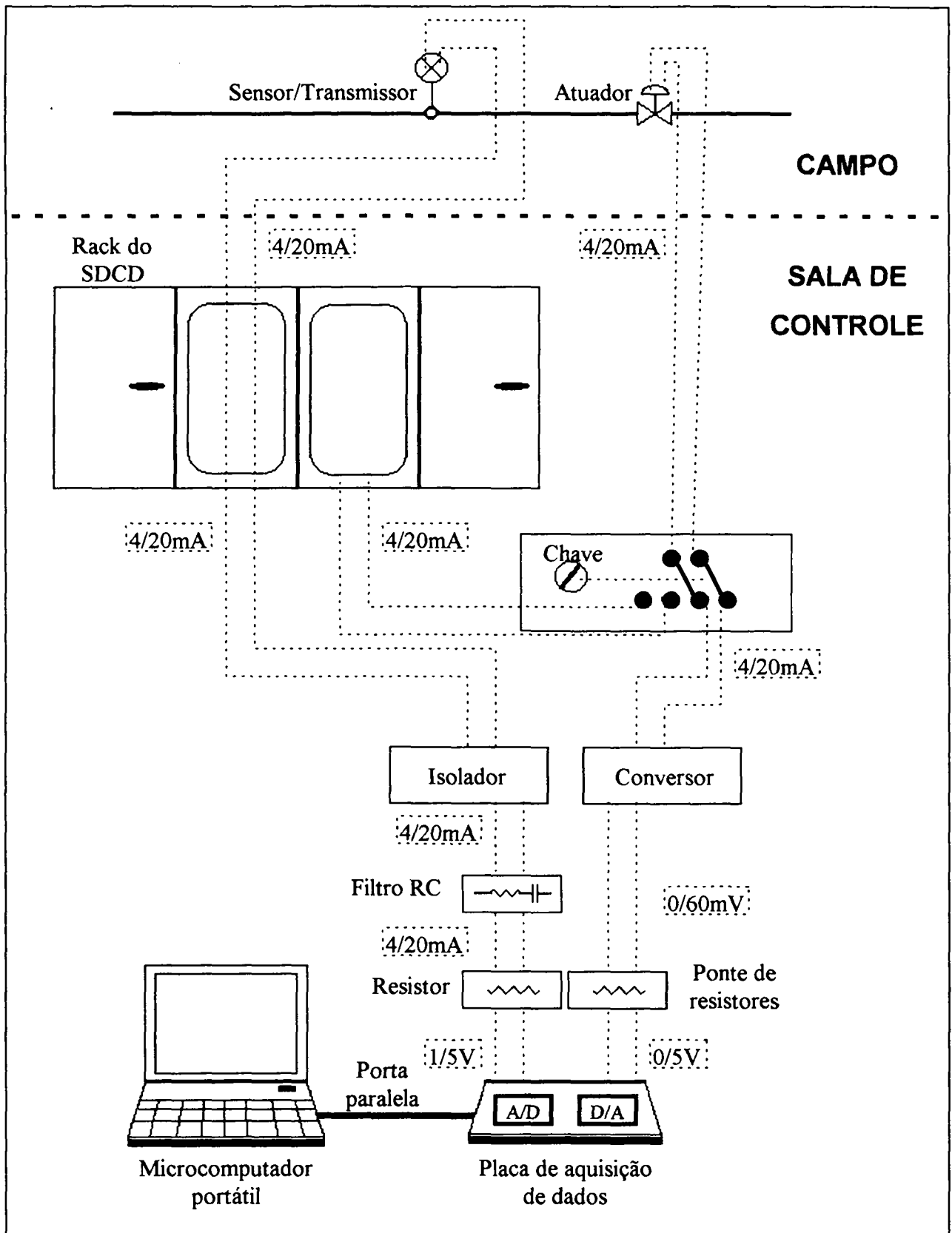


Figura 23 - Ligações dos equipamentos durante os ensaios de campo.

## 4.4 O SOFTWARE

Além do *hardware* descrito na seção anterior, o sistema de aquisição é formado também por um *software*. As suas funções mais importantes são:

1. programar a placa de aquisição adequadamente;
2. implementar o algoritmo de controle e sincronizar as tarefas para o controle: realizar leitura do conversor A/D, calcular o controle, enviar a ação de controle para o conversor D/A;
3. implementar o procedimento e o método de reconhecimento de malha aberta do processo;
4. fornecer uma interface, inclusive com recursos gráficos, para a operação do sistema de aquisição, com possibilidade de alterar diversos parâmetros, como por exemplo, os ajustes do controlador ou o período de amostragem;
5. arquivar os testes em malha aberta e em malha fechada, para análise e documentação posterior.

Durante o desenvolvimento do controlador PID AutoAdaptativo no LCMI (Abreu, 1992; Arioni, 1991; Caetano, 1992; Kammer, 1992; Pagano, 1989), várias contribuições foram sendo criadas e implementadas com o passar do tempo, resultando num *software* que poderia ser utilizado para a realização de testes de malha aberta e controle em processos. A Dissertação de Mestrado de Abreu (1992), encerrou a implementação de tal *software* para controle, com a maioria das características listadas anteriormente. Ele foi utilizado, neste trabalho, como um ponto de partida para o desenvolvimento da ferramenta exigida. Nele, foram feitas várias modificações e inclusões de características que se faziam necessárias durante os testes de campo. Na implementação, utilizou-se a linguagem C, e o compilador C6.0 da Microsoft®, pois já estavam sendo usados anteriormente. Um diagrama de blocos da estrutura final do *software* desenvolvido está apresentado na Figura 24. Ele está representado através de três blocos principais: “Interface Homem/Máquina”, “Implementação do Ajuste Automático”, e finalmente,

“Aquisição e Controle”. As partes que compõem esses blocos, e as suas respectivas funções, serão descritas nas próximas três subseções.

#### 4.4.1 AQUISIÇÃO E CONTROLE

É responsável por todas as tarefas relativas a programação adequada da placa de aquisição de dados e implementação e execução do algoritmo PID discreto. É composto por:

- **Rotinas para programação da placa de aquisição:** inicia e encerra a comunicação entre a placa e o microcomputador, configura parâmetros da placa, programa o período de amostragem e o tipo de aquisição realizada.
- **Rotina de tratamento de interrupção:** sincroniza as tarefas de leitura do conversor A/D, execução do algoritmo de controle e escrita no conversor D/A. A implementação do algoritmo PID discreto, a partir do seu equivalente contínuo, está apresentada no anexo 4. Foi incorporada neste algoritmo uma estratégia de eliminação da sobrecarga da ação integral proposta por Bruciapaglia *et al.* (1986).

#### 4.4.2 IMPLEMENTAÇÃO DO AJUSTE AUTOMÁTICO

Engloba todas as rotinas necessária para a execução dos ensaios em malha aberta, obtenção dos parâmetros do modelo do processo, cálculo dos parâmetros do controlador e armazenamento de dados e informações. Constitui-se de:

- **Identificação do ruído:** esta identificação é utilizada pelo módulo de pré-processamento do sinal, e fornece um valor denominado de “Faixa de Ruído” (FR) em função da variação em torno da média do sinal medido. Maiores informações podem ser obtidas na Dissertação de Abreu (1992).
- **Pré-processamento do sinal:** é utilizado para atenuação do ruído do sinal, para que o método de identificação da dinâmica do processo possa ser executado adequadamente.

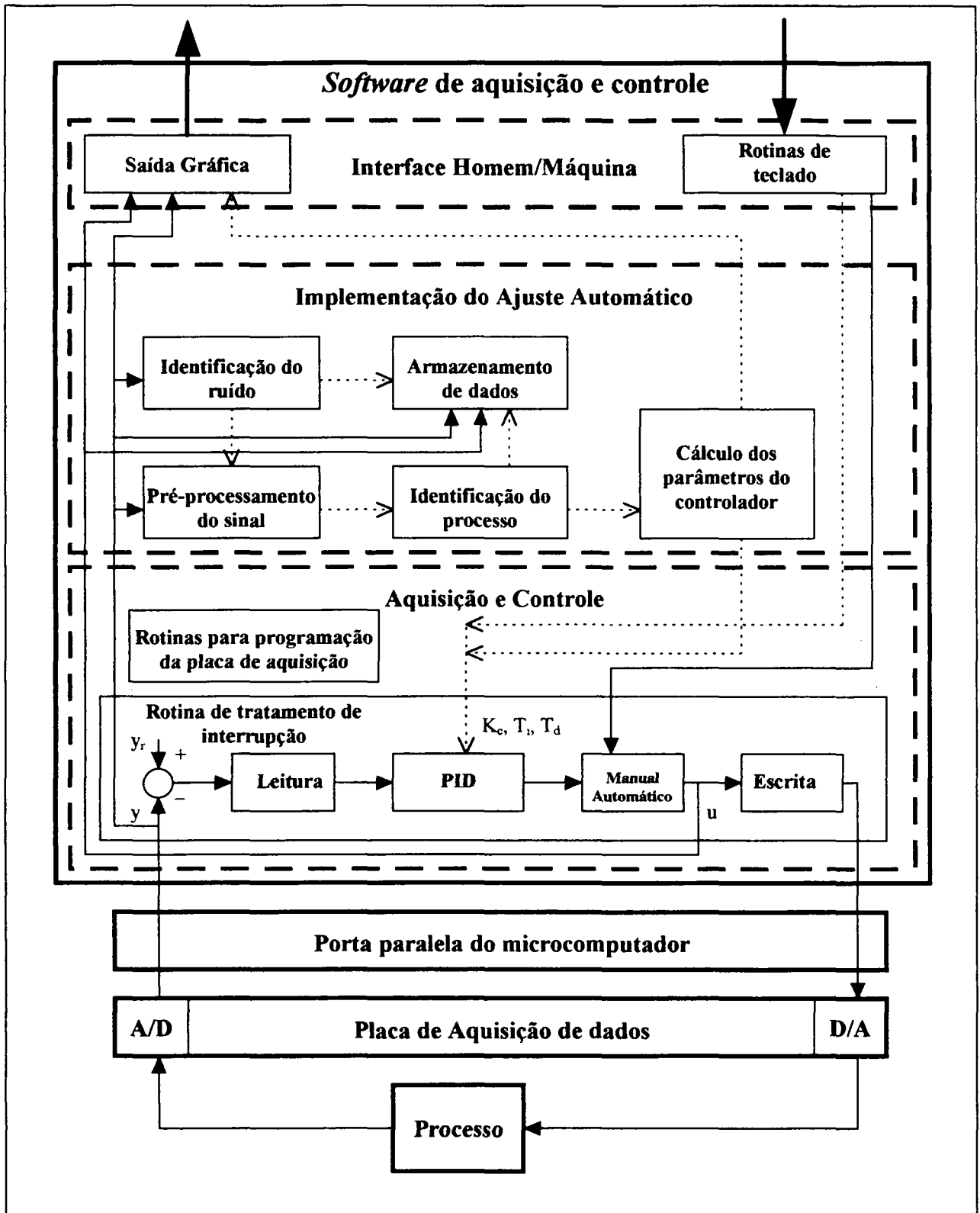


Figura 24 - Estrutura do *software* implementado.

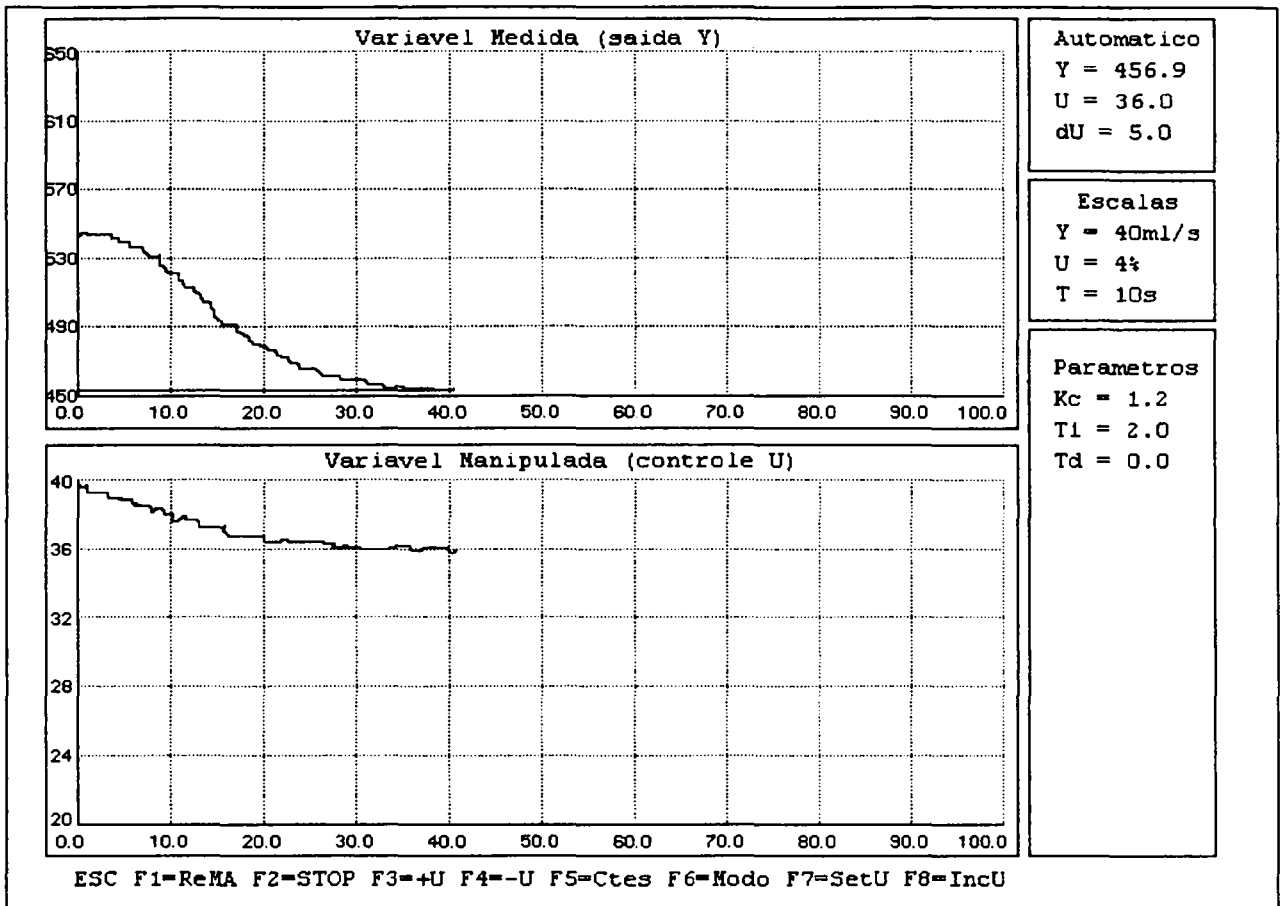


- **Identificação do processo:** permite a extração dos parâmetros do modelo do processo, de acordo com os métodos implementados, que até o momento são quatro: método de Ziegler-Nichols (1942), o método de C. L. Smith (Smith, C. A. & Corripio, 1985, p. 219), o método de Sundaresan-Krishnaswamy (Seborg *et al.*, 1989, p. 172-173) e o método das Áreas Características (Nishikawa *et al.*, 1984).
- **Cálculo dos parâmetros:** a partir da seleção de um dos métodos de identificação, aplica-se equações de ajustes que fornecem os parâmetros dos controladores PID através de várias propostas implementadas, que também deve ser selecionada pelo operador.
- **Armazenamento de informações:** armazena em arquivos as curvas obtidas nos testes de malha aberta ou durante o controle em malha fechada, e também as informações referentes às identificações do processo.

#### 4.4.3 INTERFACE HOMEM/MÁQUINA

Realiza a troca de informações do sistema com o operador, através do monitor e do teclado do computador. Possui as seguintes rotinas:

1. **Rotinas para saída gráfica:** apresentam curvas dos sinais de controle, medição do processo e referência (quando em malha fechada). Na Figura 25, apresenta-se a tela gerada pela interface homem/máquina.
2. **Rotinas de teclado:** permite que o operador configure ou altere todos os parâmetros referente ao *software*, atue no processo em malha aberta (definindo o valor de controle), determine o valor de referência em malha fechada, inicie um teste de reconhecimento ou altere os parâmetros de ajuste do PID, entre muitas outras opções.



**Figura 25 - Tela apresentada pelo software.**

Resumidamente, as principais implementações realizadas durante este trabalho foram:

1. modificação na interface gráfica para permitir a apresentação correta de diálogos e informações em monitores com padrão VGA ou SVGA com cores;
2. rotinas apropriadas para a placa de aquisição de dados DaqBook/100™, incluindo-se aí a programação do relógio da placa para interromper por *hardware* o processamento do microcomputador a cada período de amostragem, a própria rotina de tratamento de interrupção e a leitura e escrita nos conversores A/D e D/A respectivamente;
3. rotinas para o arquivamento das curvas e das informações obtidas com os testes de reconhecimento de malha aberta e de malha fechada;

4. implementação de quatro métodos diferentes de identificação dos parâmetros do processo;
5. encerramento automático do teste de reconhecimento, através da verificação da estabilização do sinal medido (antes era necessário definir o tempo máximo de duração do teste, o que exigia um conhecimento antecipado do valor aproximado da constante de tempo dominante do processo);
6. implementação do tratamento do sinal (suavização da curva), obtido com o teste de reconhecimento do processo através do método que divide a curva total em intervalos e realiza uma regressão polinomial de 2ª ordem em cada um destes intervalos, para obter uma curva suavizada (Abreu, 1992, capítulo 4). Este tratamento é importante em sinais que estejam alterados por ruído, que é o caso normal em medições industriais. Um exemplo de uma curva obtida em um teste de reconhecimento de malha aberta, com a respectiva curva ajustada por este método, está apresentada na Figura 26. Maiores detalhes sobre o reconhecimento de malha aberta são apresentados na próxima seção.

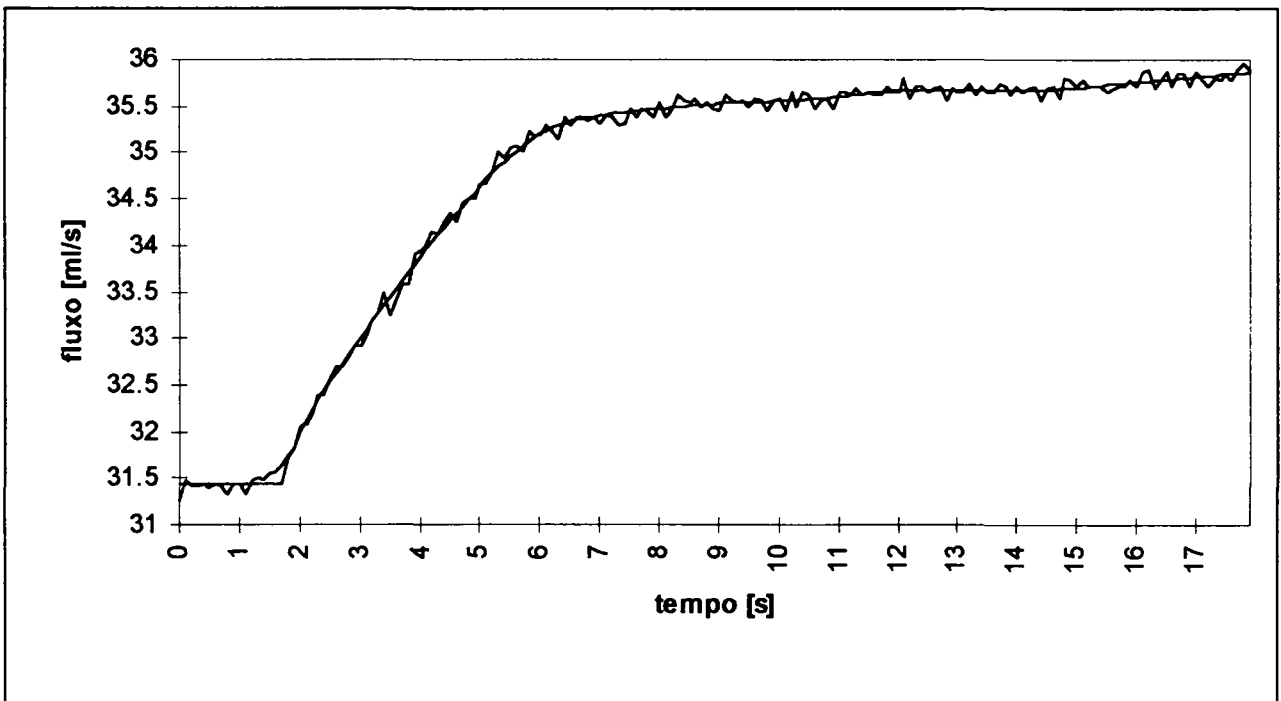


Figura 26 - Curva suavizada pelo método de regressões de 2ª ordem por intervalos.

Com estas inclusões e modificações, além da eliminação de alguns problemas de programação que existiam, obteve-se um *software* adaptado às exigências deste trabalho e em condições de ser utilizado com o *hardware* disponível.

## 4.5 MÉTODOS DE RECONHECIMENTO DE MALHA ABERTA

Muitas técnicas de ajuste de controladores, inclusive aquela apresentada neste trabalho, necessitam que primeiramente determine-se um modelo para a dinâmica do processo, e então, calcule-se os parâmetros do controlador baseado em algum método de projeto. Existem muitas técnicas disponíveis para determinar a dinâmica de um processo. Aström e Hägglund (1988, capítulo 3), por exemplo, classificam estas técnicas em três tipos:

1. técnicas de análise da resposta transitória: determinam a dinâmica do processo, em função da resposta deste a algum sinal determinístico, como um pulso, um salto ou uma rampa;
2. técnicas de resposta freqüencial: analisam a resposta estacionária a sinais senoidais;
3. técnicas baseadas na estimação de modelos paramétricos: são obtidas através do ajuste de parâmetros de um modelo a dados experimentais. Não estão vinculadas a nenhum tipo de entrada ou saída específicas, mas são mais complexas do que as anteriores, e por isto, requerem mais recursos computacionais.

Ainda segundo Aström e Hägglund (1988), o primeiro tipo de técnica, pressupõe que o sistema seja linear, esteja em repouso antes que a entrada seja aplicada, e caso não haja erro de medição, a dinâmica do processo é unicamente determinada por esse experimento. Como é muito difícil, na prática, que essas três suposições se verifiquem, esses métodos estão limitados a obtenção de modelos simples, que para controladores PID são suficientes (p. 30). Além do mais, esses métodos são muito simples de serem utilizados, e também simples de serem implementados, pois não necessitam de muitos recursos matemáticos. Por outro lado, já vem sendo utilizado em outros trabalhos no LCMI um método desse tipo (método de Ziegler-Nichols ou ZN), baseado num teste do tipo degrau sobre o processo. Vários procedimentos necessários para a utilização dessa técnica já estão implementados em *software*. Pelos motivos acima (principalmente pela sua

adequação para o ajuste de controladores PI e PID), decidiu-se utilizar esse tipo de técnica para a determinação da dinâmica do processo, baseada na análise da resposta transitória do mesmo quando submetido a uma excitação do tipo degrau (reconhecimento de malha aberta).

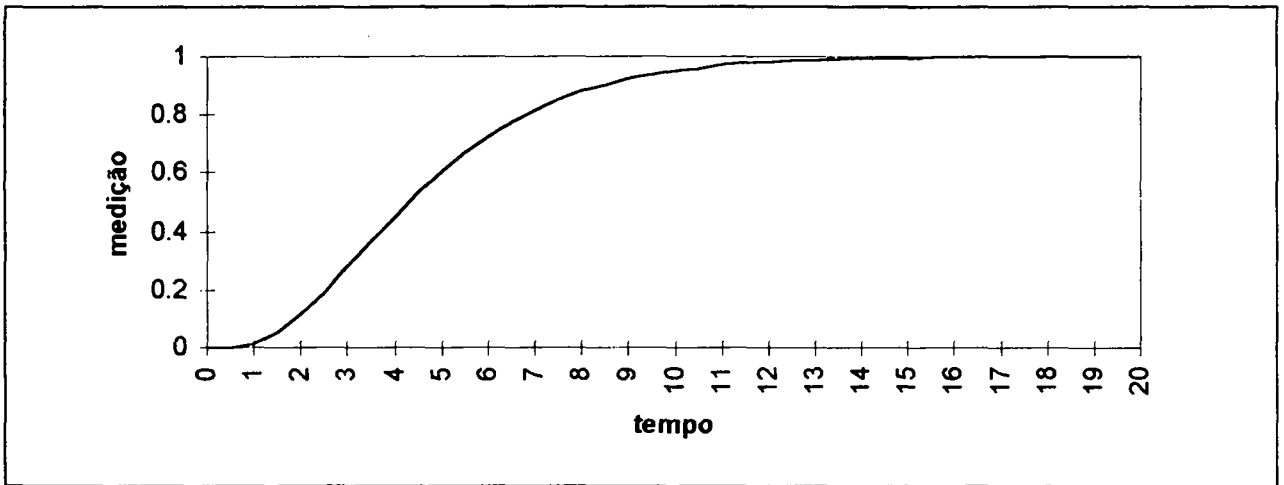
São necessárias várias etapas para a realização de um reconhecimento de malha aberta. A relação completa dessas etapas está apresentada a seguir, de maneira enumerada:

1. com o processo em malha aberta (e um valor fixo na entrada de controle do processo), após a estabilização do sinal medido, determinar, de maneira automática, a faixa de ruído (FR) do sinal – referenciado na seção anterior – juntamente com o valor médio inicial da variável medida ( $y_i$ );
2. definição pelo operador da amplitude do degrau a ser aplicado no processo ( $\Delta u$ );
3. aplicação automática do degrau no processo e armazenamento da resposta deste (esta resposta é conhecida como *curva de reação do processo*);
4. finalização automática do teste, quando for verificada a estabilização da variável medida, sendo obtido também o valor médio final da mesma ( $y_f$ );
5. para todos os pontos que, logo após a aplicação do degrau, mantiverem-se dentro da faixa de ruído identificada anteriormente, atribuir a eles o valor médio inicial da variável medida  $y_i$  (obtido antes da aplicação do degrau);
6. realização do pré-processamento (método de suavização citado na seção anterior) em todos os pontos subsequentes àqueles descritos no item anterior (nos pontos que encontram-se fora da faixa de ruído);
7. reconhecimento (de forma automática) dos parâmetros do processo, através do método de Smith, que é utilizado neste trabalho.

A maioria dos processos industriais, e certamente todos os processos de fluxo, em condições normais de operação, apresentam uma resposta ao degrau como aquela da Figura 27 (conhecida como *curva de reação do processo*), ou seja, monotônica (nunca diminui com o passar do tempo) e estável na medida em que atingem um valor máximo (sem saturação na

medição do processo), num tempo finito. Para uma resposta deste tipo, um modelo simples de 1ª ordem com atraso é apropriado para a caracterização da dinâmica do processo, considerando-se que o algoritmo de controle é um PID e que as especificações de controle não são muito exigentes. Portanto, o modelo possui a seguinte função de transferência:

$$\frac{G}{1 + \tau s} e^{-Ls} \quad (4.1)$$



**Figura 27 - Reposta ao degrau típica em processos industriais.**

Na próxima subseção, será descrito o método de Smith (adotado neste trabalho, conforme descrito no capítulo 3), que através de um teste em malha aberta, permite identificar os três parâmetros do modelo: o ganho estático do processo, uma constante de tempo equivalente e um atraso de transporte efetivo. A identificação do ganho do processo é obtida no final do teste, através do quociente entre a diferença dos valores final ( $y_f$ ) e inicial ( $y_i$ ) do sinal medido e a amplitude do degrau na entrada do processo ( $\Delta u$ ), ou seja:

$$G = \frac{y_f - y_i}{\Delta u} \quad (4.2)$$

#### 4.5.1 MÉTODO DE RECONHECIMENTO DE SMITH

Segundo (Smith, C. A. & Corripio, 1985, p. 219), para evitar o problema de encontrar a linha tangente ao ponto de inclinação máxima da curva de reação, que existe no método de Ziegler e Nichols (1942), Cecil L. Smith propôs que estime-se  $L$  e  $\tau$ , de tal maneira que a resposta do modelo coincida em dois pontos com a resposta real do processo, pontos estes localizados numa região de forte crescimento do sinal medido. Os pontos recomendados foram  $(L + \tau / 3)$  e  $(L + \tau)$ . Desta maneira, pode-se demonstrar facilmente que para o modelo dado pela equação (4.1), esses pontos equivalem a 28,3% e 63,2% do valor final da curva de reação, conforme a Figura 28. Os tempos nos quais estes valores são atingidos, serão denominados de  $t_{28,3}$  e  $t_{63,2}$  respectivamente. Após esses tempos serem medidos na curva real do processo, os parâmetros do modelo são obtidos pelas seguintes equações:

$$\tau = 1,5(t_{63,2} - t_{28,3}) \quad (4.3)$$

$$L = t_{63,2} - \tau \quad (4.4)$$

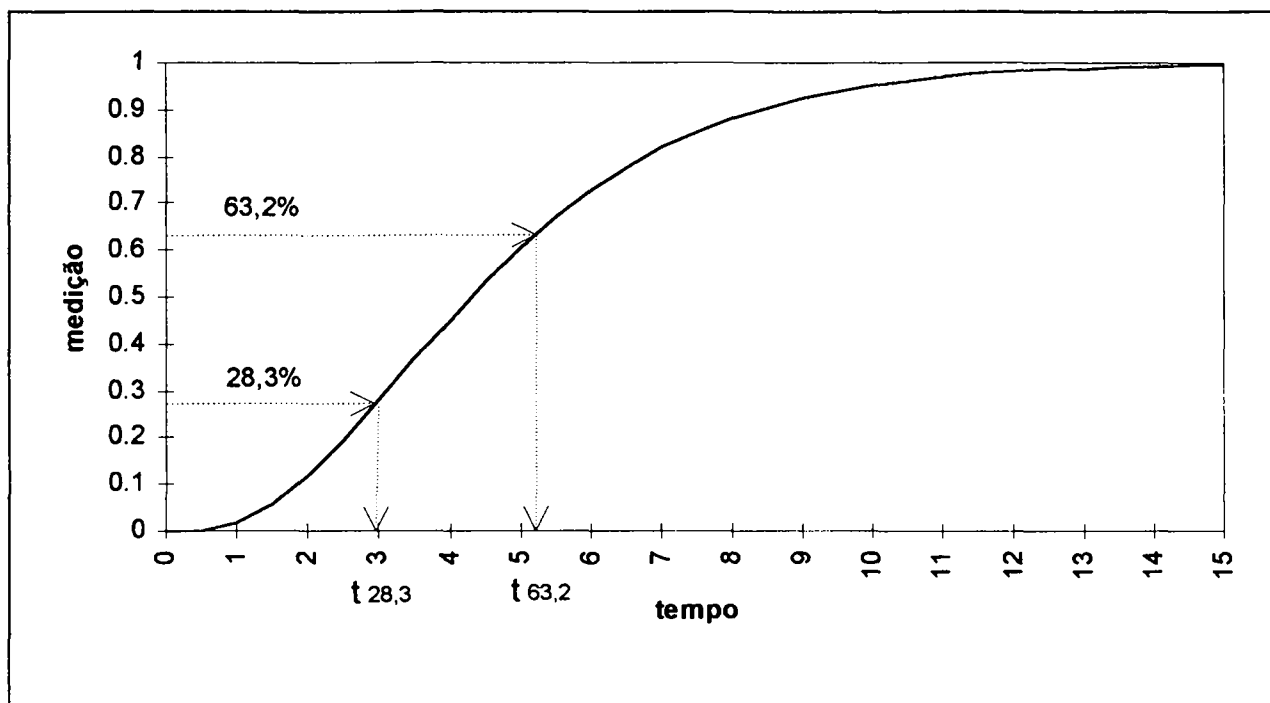


Figura 28 - Método de identificação de Smith.

## 4.6 CONCLUSÃO

Este capítulo iniciou com a descrição do sistema de controle utilizado em grande parte da planta da RIOCELL e dos motivos que não permitiram o aproveitamento de recursos incluídos nesse equipamento para a realização de experimentos de campo.

Depois, abordou-se questões relativas ao *hardware* adquirido (microcomputador e placa de aquisição de dados) e também questões de ordem técnica, que exigiram a utilização de um isolador e um conversor entre os sinais de campo e o sistema de aquisição de dados. Para ser utilizado em conjunto com o *hardware*, desenvolveu-se uma ferramenta de *software* apresentada na seção 4.4. Foram descritas também as precauções tomadas e os procedimentos que foram realizados durante os ensaios na planta industrial. Todos esses recursos serão utilizados também no prosseguimento deste trabalho (ver capítulo 6).

Um outro recurso, apresentado neste capítulo, e necessário durante o desenvolvimento, foi um método de identificação da dinâmica do processo. No presente trabalho, optou-se por utilizar o método de Smith pela sua pequena variação transitória entre processo e modelo e por sua simplicidade de implementação, conforme foi descrito no capítulo 3.



No próximo capítulo, serão descritos os resultados obtidos com o ajuste automático de controladores PI para processos de fluxo, assim como um problema encontrado em algumas malhas industriais, que tem origem no atrito existente em válvula reguladoras.

## **CAPÍTULO 5**

# **AVALIAÇÃO DO AJUSTE AUTOMÁTICO PARA PROCESSOS DE FLUXO**

### **5.1 INTRODUÇÃO**

No capítulo 3, apresentou-se uma proposta de ajuste inicial de controladores PI, formulada para atender às exigências específicas das malhas de fluxo. Para verificar se esta proposta realmente está de acordo com as especificações de desempenho das malhas de fluxo, também definida no capítulo 3, é necessário que a mesma seja testada e avaliada.

Para realizar esta avaliação, foram executados testes numa unidade experimental de laboratório, envolvendo mudanças de referência e rejeição de perturbações. Além da unidade de laboratório, a condução de vários testes em malhas industriais de fluxo (pertencentes a planta de cloro-soda da RIOCELL) também oferecem resultados sobre o desempenho dos ajustes automáticos em condições normalmente encontradas em indústrias.

Este capítulo é composto por duas seções. A primeira trata dos testes na unidade experimental. A segunda seção apresenta resultados dos testes em três malhas da planta industrial, e ainda um problema de oscilação que surge em malhas de controle devido à zona-morta presente nas válvulas (apresentada no capítulo 2), que foi verificada em uma outra malha. Os resultados são apresentados principalmente na forma de gráficos. Nas subseções relativas às malhas industriais, também apresentam-se respostas obtidas com o sistema de controle da RIOCELL, para efeito de comparação.

Para a escolha do período de amostragem ( $t_s$ ) do sinal, existem muitas propostas na literatura. Seborg *et al.* (1989, p. 535), apresentam um total de 13 regras diferentes, obtidas em várias fontes, que orientam esta escolha, as quais fornecem valores para  $t_s$  que podem variar

bastante para um mesmo caso. Optou-se, neste trabalho, por utilizar uma proposta de escolha de  $t_s$  que sugere fixá-lo num valor pelo menos 10 vezes menor do que a constante de tempo dominante do processo. Para os processos de fluxo utilizados nos testes, o valor mínimo verificado para a constante de tempo foi de aproximadamente 1s. Portanto, utilizou-se  $t_s = 0,1s$  em todos os testes (em laboratório e na indústria).

## 5.2 AVALIAÇÃO NUMA UNIDADE EXPERIMENTAL DE FLUXO

Este processo de laboratório é constituído por uma bomba, um tanque, válvulas manuais, uma válvula automática, tubulações e instrumentação eletrônica e digital, de tal maneira a propiciar uma malha de fluxo de água, com todas as condições para que a mesma seja controlada. Ele está representado esquematicamente na Figura 29. O sistema de aquisição e controle, é o mesmo apresentado no capítulo anterior.

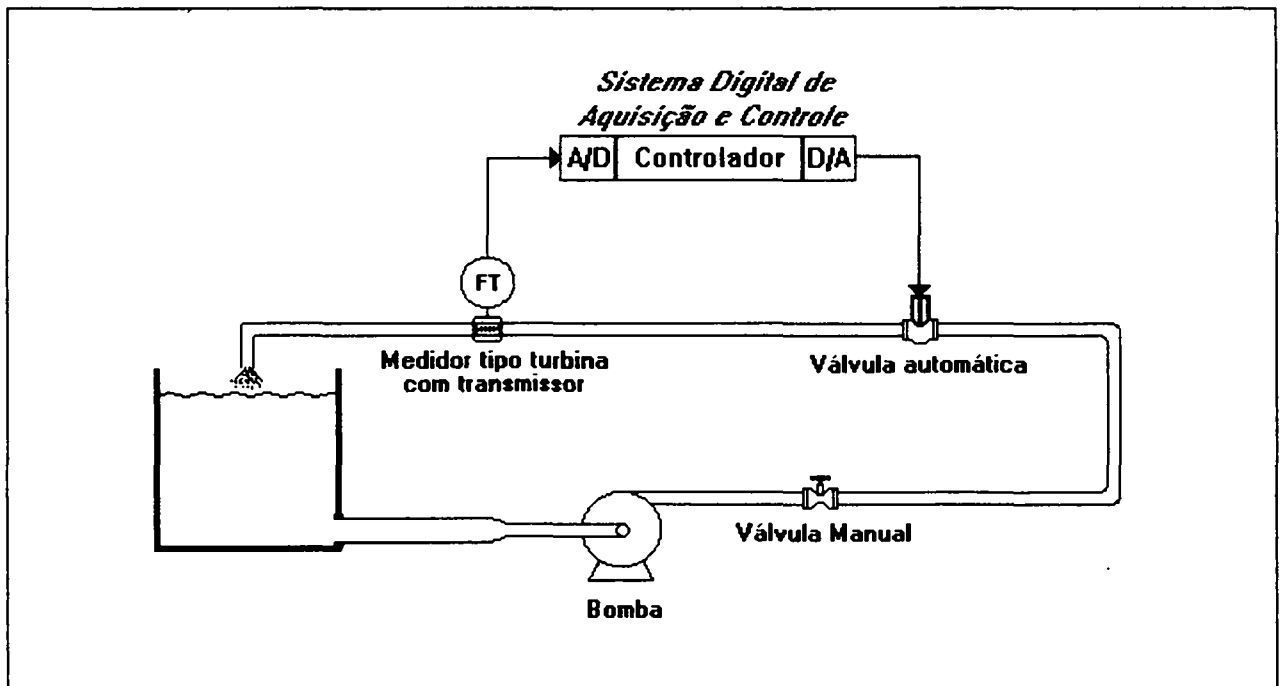


Figura 29 - Processo de fluxo de laboratório

Na próxima subseção, aborda-se a questão do reconhecimento do processo, que é a primeira etapa na realização dos experimentos. Nas outras duas subseções, descrevem-se os resultados dos ensaios de mudança de referência e de rejeição de perturbação, respectivamente.

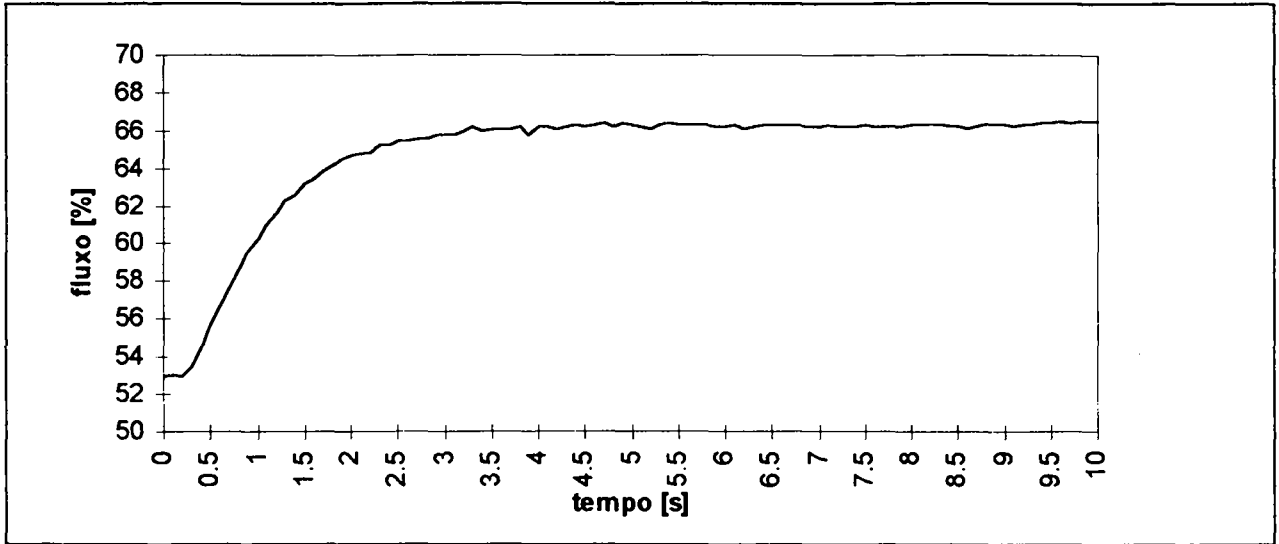
### 5.2.1 RECONHECIMENTO E AJUSTE

O primeiro passo na realização dos testes, é escolher um ponto de operação arbitrário. Escolhido esse ponto, realiza-se uma identificação da dinâmica do processo, com um teste de reconhecimento (resposta ao degrau) de malha aberta pelo método de Smith, seguindo a sequência de passos descrita no capítulo anterior (seção 4.5). A partir desse reconhecimento, obtém-se os parâmetros de ajuste do controlador através dos métodos propostos neste trabalho.

A título de ilustração, na Figura 30 apresenta-se a resposta desse processo de fluxo, durante um teste de reconhecimento de malha aberta. Neste teste, o ponto de funcionamento escolhido foi em 60% de abertura da válvula (que correspondeu, neste caso, a 52,9% do fluxo máximo). O degrau na entrada de controle do processo foi aplicado em  $t=0$ , e foi arbitrariamente fixado em 10% (de 60% para 70%, portanto).

Numa malha real em operação, o valor deste degrau normalmente não pode ser muito elevado, pois o processo deve permanecer próximo ao seu ponto de operação. Neste caso, por tratar-se de uma unidade experimental, não há, a priori, uma limitação para o valor do degrau a ser aplicado. É claro que pelo fato da maioria dos processos industriais apresentarem características dinâmicas diferentes de um ponto de operação para o outro (inclusive os de fluxo), também não convém afastar-se muito do ponto de operação no qual a malha deve trabalhar.

Por outro lado, se o degrau for muito pequeno, a resposta também o será, e neste caso, o ruído presente no sinal poderá prejudicar o reconhecimento. Além disso, a característica de limitação de velocidade dos acionadores, discutida no capítulo 2, não é muito acentuada para sinais de controle de pequena amplitude. Portanto, a escolha do valor do degrau representa um }  
{ compromisso, que deve ser levado em conta no momento da sua escolha.



**Figura 30 - Resposta ao degrau para realização do reconhecimento do processo.**

Para este reconhecimento (da Figura 30) os valores fornecidos foram:

$$\begin{aligned} G &= 1,35 \% / \% \\ \text{Reconhecimento: } \left. \begin{array}{l} L = 0,29s \\ \tau = 0,91s \end{array} \right\} \frac{L}{\tau} &= 0,32 \end{aligned}$$

### 5.2.2 COMPORTAMENTO PERANTE MUDANÇA DE REFERÊNCIA

Após definido o ponto de funcionamento do processo e realizado o reconhecimento, conforme a subseção anterior, os ajustes são obtidos. Pode-se, então, realizar os testes para a avaliação do desempenho fornecido pelo ajuste.

Decidiu-se realizar testes de referência entre 60% e 80% da faixa de operação, que representa uma grande variação no ponto de operação. O teste de reconhecimento, é o apresentado na subseção anterior (Figura 30). Durante este teste, o fluxo permaneceu dentro da região de operação, e forneceu os seguintes parâmetros:

$$\begin{aligned} G &= 1,35 \% / \% \\ \text{Reconhecimento: } \left. \begin{array}{l} L = 0,29s \\ \tau = 0,91s \end{array} \right\} \frac{L}{\tau} &= 0,32 \end{aligned}$$

Com estes parâmetros, os ajustes foram:

Ajuste Lento:  $K_c = 0,57 \text{ \% / \%}$   
 $T_i = 0,95s$

Ajuste Rápido:  $K_c = 0,89 \text{ \% / \%}$   
 $T_i = 0,98s$

Os gráficos, para mudanças de referência de 60% para 80% e de novo para 80%, estão na Figura 31 e na Figura 32. Nestes gráficos, o fluxo está referenciado no eixo vertical esquerdo, e a ação de controle (denominada de válvula, em todos os gráficos deste capítulo), no eixo vertical da direita. As escalas, para a válvula, são diferentes nas duas figuras.

No caso do ajuste lento, as respostas foram sobreamortecidas, conforme a especificação, e a referência foi alcançada por volta de 4s após a aplicação da mudança de referência (aproximadamente 4 constantes de tempo de malha aberta). Para o ajuste rápido, as respostas apresentaram um pouco de oscilação, mas o sobrepasso do sinal foi pequeno (5% para ambos os casos). Por causa da oscilação, o fluxo estabilizou num tempo maior para o teste do ajuste rápido do que para o teste do ajuste lento (na segunda mudança de referência da Figura 32), embora a referência tenha sido alcançada, pela primeira vez, em menos de 2s em ambos os testes do ajuste rápido.

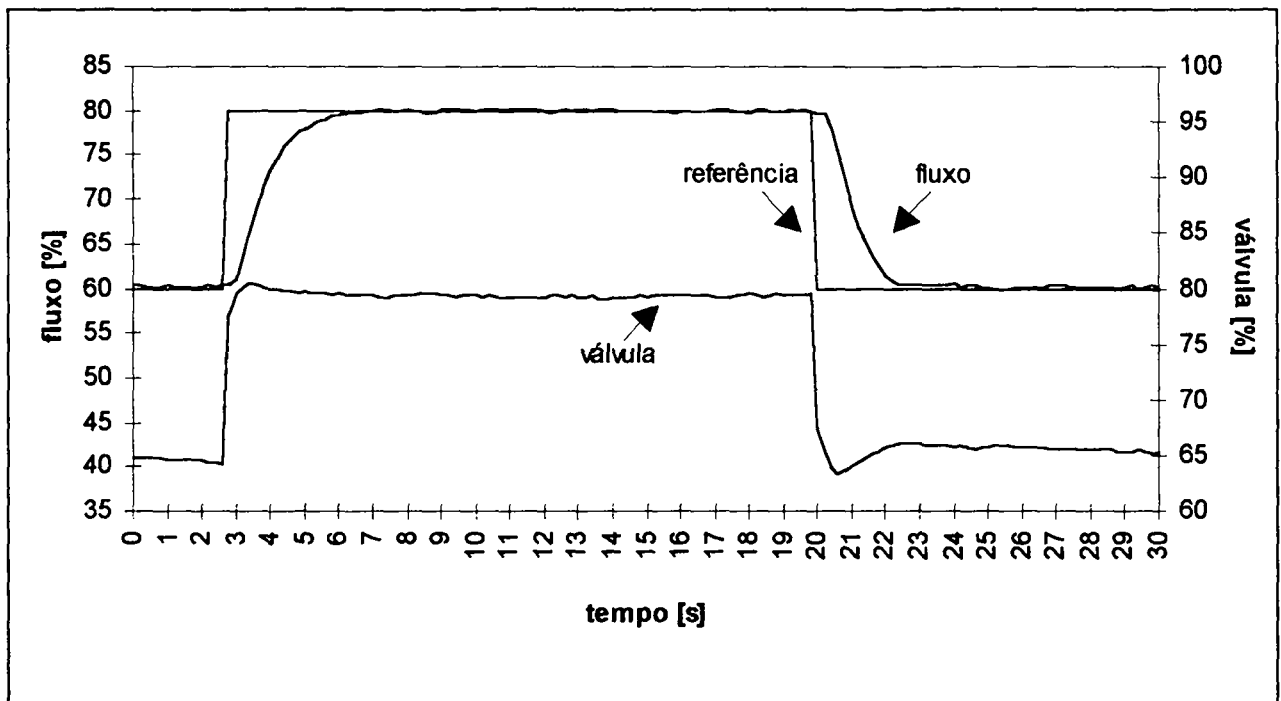
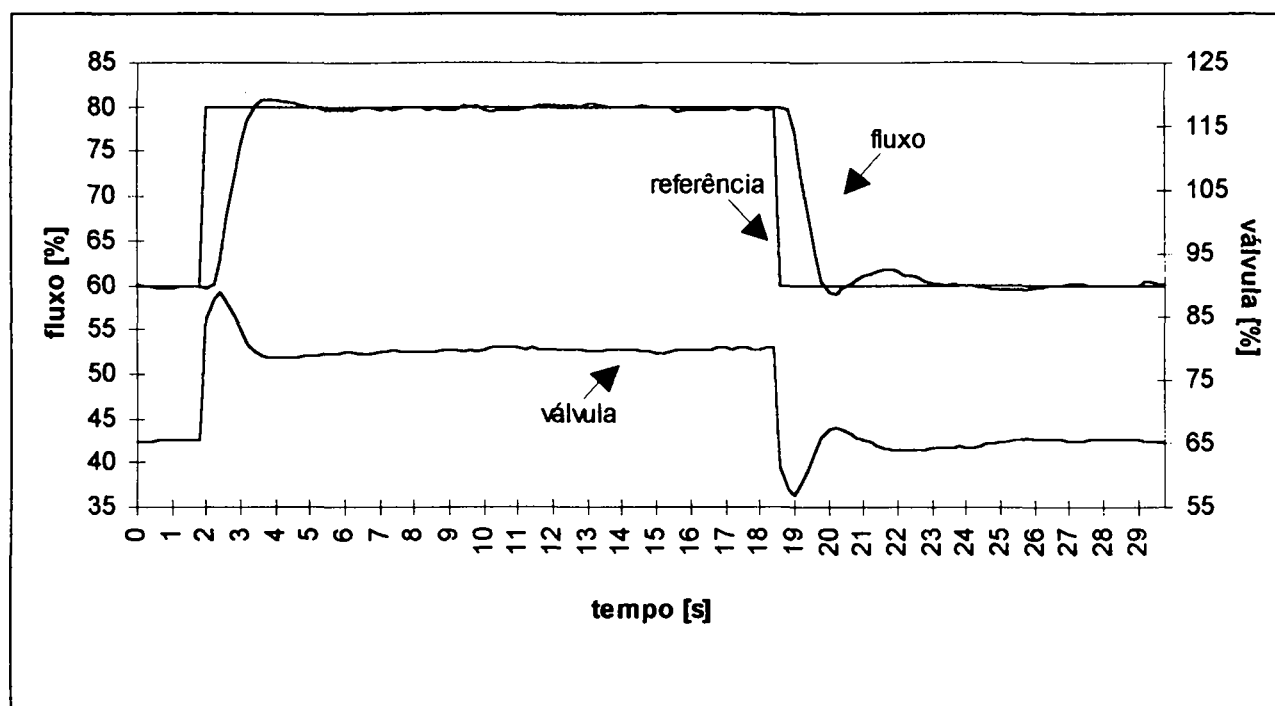


Figura 31 - Teste de referência do ajuste lento em laboratório.



**Figura 32 - Teste de referência do ajuste rápido em laboratório.**

### 5.2.3 REJEIÇÃO DE PERTURBAÇÕES

Além da avaliação de alteração da referência, também realizaram-se testes de rejeição de perturbação. A região escolhida para operação foi em torno de 40% da faixa de fluxo. A perturbação no processo da Figura 29 foi obtida através da alteração da abertura da válvula manual. O procedimento para a realização dos testes foi:

1. Inicialmente, a válvula manual foi totalmente aberta.
2. Com um teste de malha aberta, realizado com a válvula automática, foram obtidos os parâmetros do processo e o controlador foi ajustado conforme os parâmetros fornecidos pelo método de ajuste lento ou rápido.
3. Fechou-se a malha e fixou-se a referência em 40% da faixa total do transmissor.
4. Após algum tempo (para aguardar que o processo atingisse o regime permanente), a válvula manual foi restringida, provocando uma perturbação.

5. Aguardou-se o processo entrar em regime, e a válvula manual foi aberta totalmente, de tal maneira que a condição inicial do processo foi restabelecida. Esta ação provocou uma nova perturbação no processo.

Embora tenha-se tentado reproduzir as perturbações, entre um teste e outro, com o máximo de fidelidade possível, por tratar-se de um procedimento de abertura e fechamento manual da válvula, sempre existiu uma diferença na amplitude e na velocidade com que a perturbação foi aplicada no processo. Além de constituir-se numa perturbação que influi diretamente na variável medida, ela também é uma perturbação paramétrica, pois tanto o ganho como a constante de tempo do processo são afetadas, como pode-se comprovar pelo estudo realizado no capítulo 2.

Os resultados do teste de reconhecimento dos parâmetros do processo, realizado com a válvula entre 50% e 55%, foram:

$$\begin{array}{l} \text{Reconhecimento:} \quad \left. \begin{array}{l} G = 1,60 \% / \% \\ L = 0,34s \\ \tau = 0,89s \end{array} \right\} \frac{L}{\tau} = 0,38 \end{array}$$

Com esta identificação, os ajustem fornecem:

$$\begin{array}{l} \text{Ajuste Lento:} \quad \left. \begin{array}{l} K_c = 0,47 \% / \% \\ Ti = 0,95s \end{array} \right\} \\ \\ \text{Ajuste Rápido:} \quad \left. \begin{array}{l} K_c = 0,73 \% / \% \\ Ti = 0,98s \end{array} \right\} \end{array}$$

Os gráficos dos testes constam da Figura 33 à Figura 36. Para cada um dos ajustes existem dois gráficos, mostrando uma perturbação mais fraca nos dois primeiros gráficos e outra mais forte nos dois gráficos seguintes, como pode-se notar pela diferença provocada no sinal de controle. Observe-se também, que a medição de fluxo é referenciada no eixo vertical da esquerda dos gráficos, e o sinal de controle (que corresponde à abertura na válvula), no eixo vertical da direita. As escalas dos eixos verticais nos dois primeiros gráficos (para a perturbação mais suave), são diferentes das escalas nos outros dois (para a perturbação mais forte).



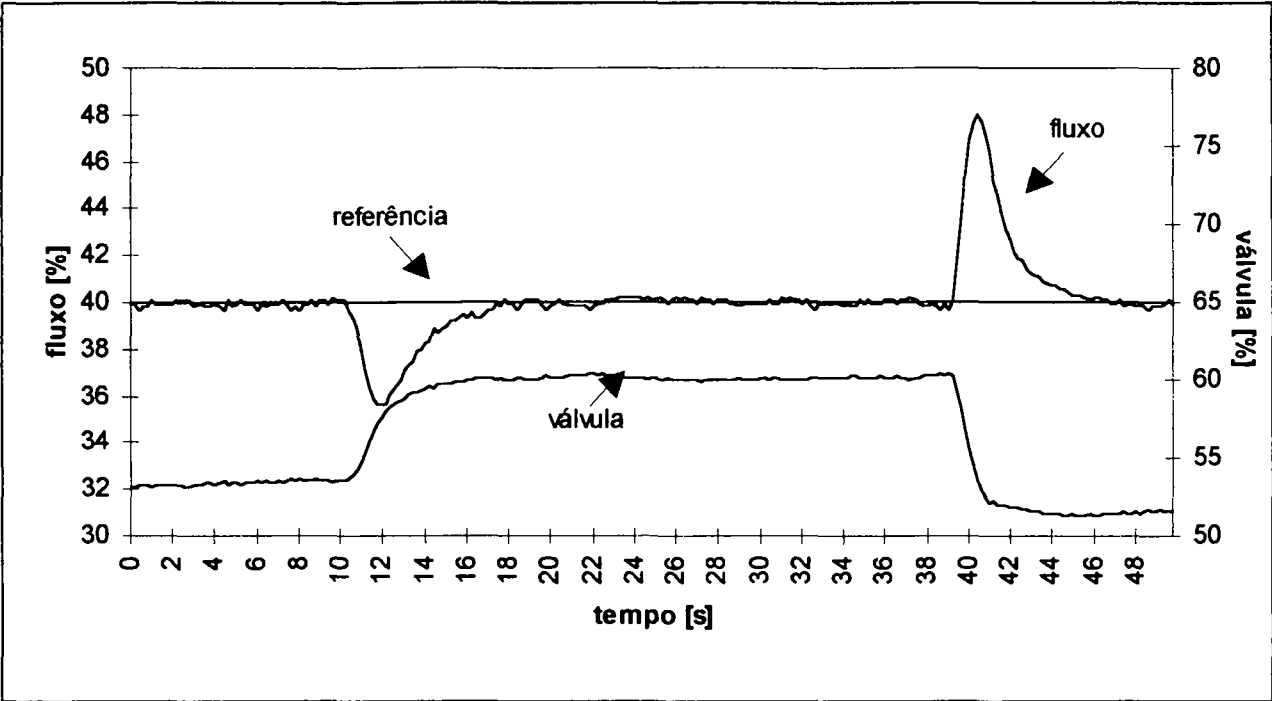


Figura 33 - Teste de perturbação (suave) do ajuste lento em laboratório.

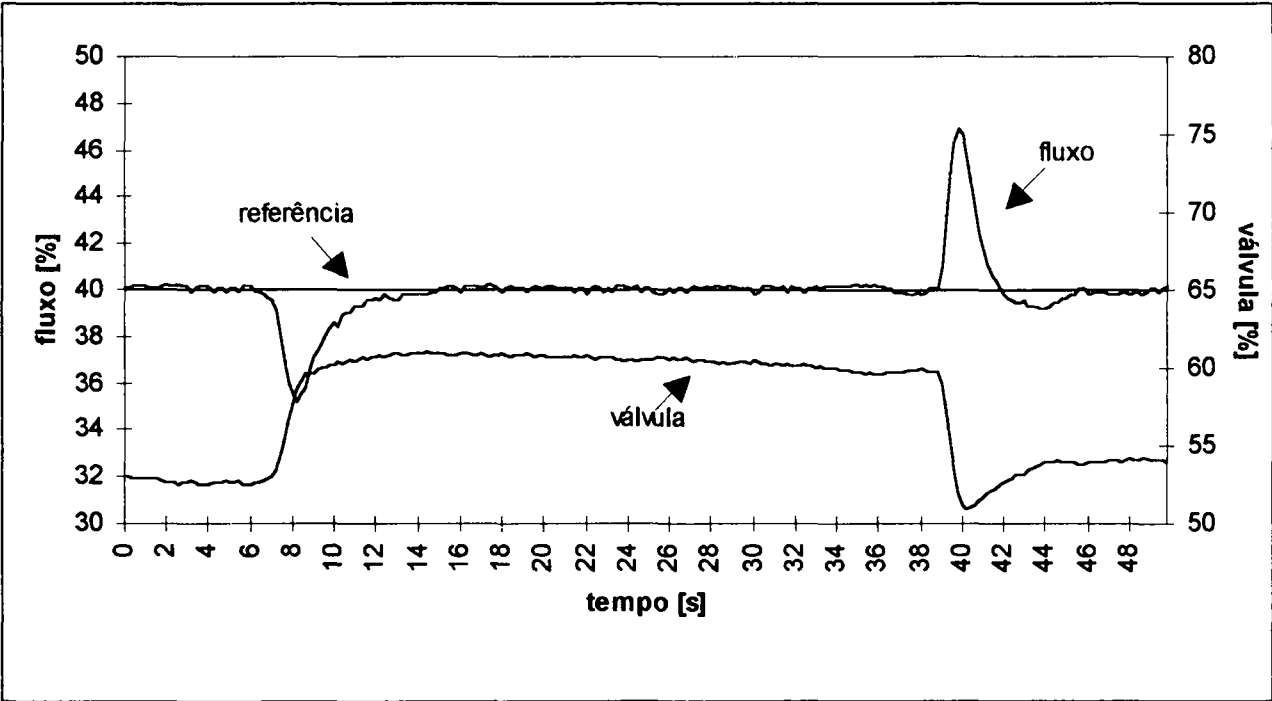
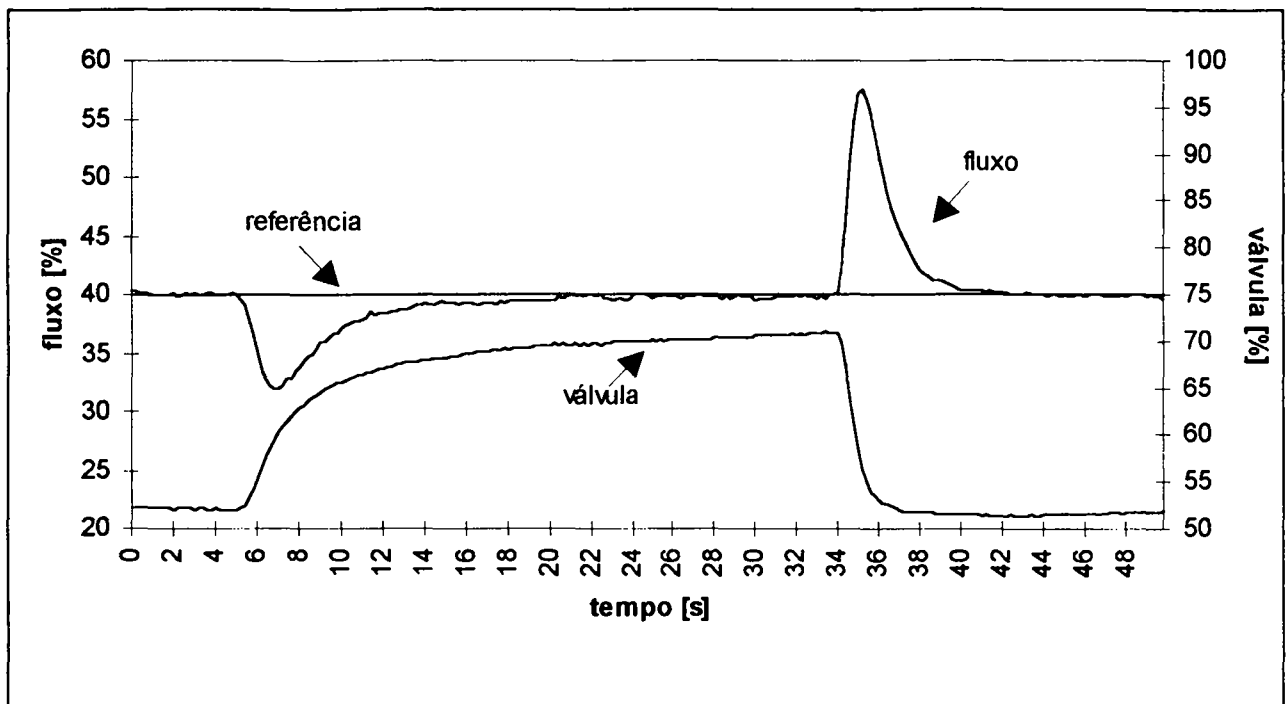
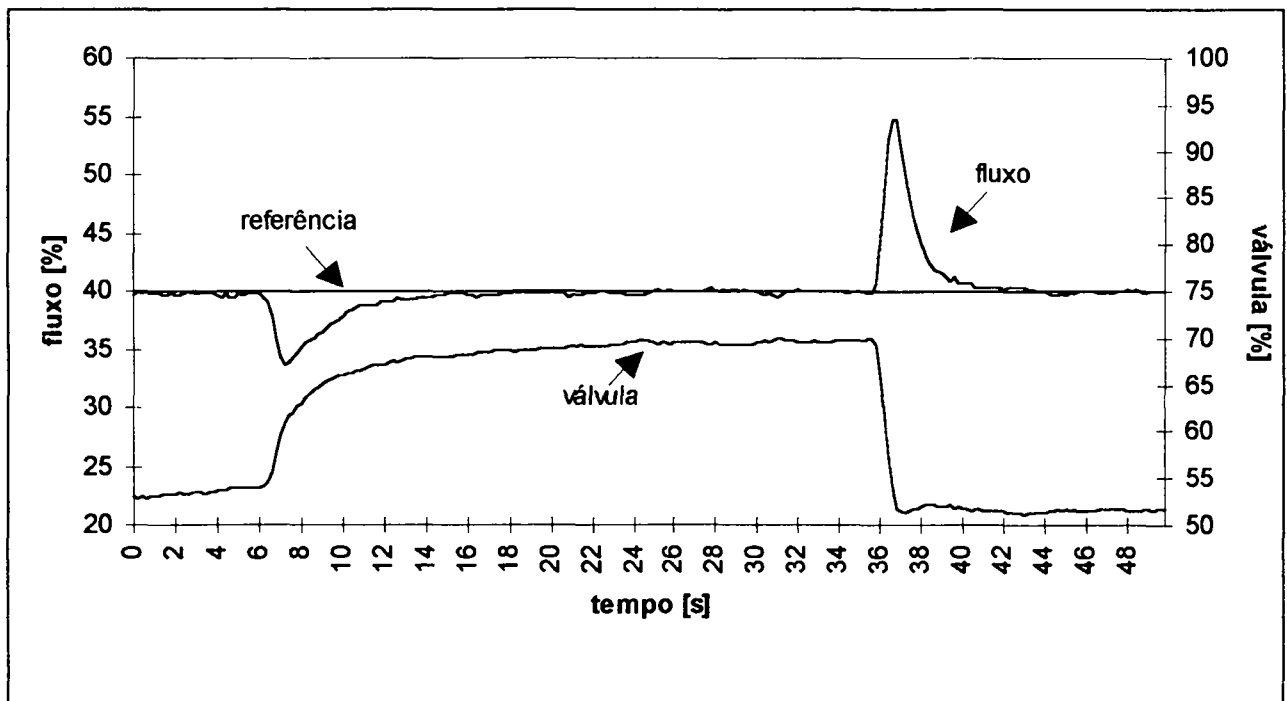


Figura 34 - Teste de perturbação (suave) do ajuste rápido em laboratório.



**Figura 35 - Teste de perturbação (forte) do ajuste lento em laboratório.**



**Figura 36 - Teste de perturbação (forte) do ajuste rápido em laboratório.**

Os desvios máximos em relação à referência dependem muito da natureza da perturbação e do atraso do processo, mas também do controle. Por isto, os desvios máximos obtidos com o

ajuste rápido foram menores do que com o lento. Como o primeiro conjunto de perturbações (Figura 33 e Figura 34) foi mais suave do que o segundo (Figura 35 e Figura 36), os valores dos picos foram maiores para esta última situação do que para a primeira. De uma maneira geral, o fluxo retornou ao seu valor de referência entre 6s e 8s após a ocorrência do pico, para o ajuste lento, e entre 5s e 7s quando utilizou-se o ajuste rápido. Com exceção de um caso (Figura 34), em todos os testes realizados, a resposta após o pico retornou suavemente, sem oscilações. Por isto, pode-se considerar que os ajustes apresentaram uma boa rejeição de perturbações, de acordo com as especificações de desempenho.

### **5.3 AVALIAÇÃO DO AJUSTE AUTOMÁTICO EM PROCESSOS INDUSTRIAIS**

Para obter uma avaliação dos ajustes em condições reais, foram realizados testes em malhas industriais. As malhas utilizadas nestes experimentos pertencem a planta de cloro-soda da empresa RIOCELL (as substâncias químicas produzidas nesta unidade, são utilizados como insumos na produção da celulose). No anexo 2, apresentam-se as características de instrumentação e controle das mesmas, juntamente com a tela utilizada no SDCD (onde estão representadas estas malhas) para auxiliar os operadores na monitoração do processo. Nestas telas, também estão representados outros equipamentos e outras malhas pertencentes ao mesmo contexto dentro do processo.

Nas próximas três subseções serão apresentados os resultados relativos às malhas de fluxo, cujos códigos de identificação são: 451FICQ-046, 451FIC-139 e 451FICA-172. Nas duas primeiras foram realizadas avaliações sobre o desempenho para mudanças de referência, e na última, além da mudança de referência, também é analisada a rejeição de perturbação. Na última subseção, descreve-se um problema não-linear apresentado pela válvula da malha 451FICA-036, que origina uma oscilação de ciclo-limite.

Durante a realização dos experimentos, a planta estava em produção. Por isto, o ponto de operação em torno do qual eram realizados o reconhecimento em malha aberta e os testes em malha fechada, eram determinados pelo operador. O degrau na entrada de controle do processo e

as mudanças de referência, também foram escolhidos de tal maneira a não afastar muito o processo do seu ponto de operação.

Para estabelecer um parâmetro de comparação, e melhor avaliar a presente proposta, são apresentadas também curvas obtidas com o controle do próprio SDCCD, com as técnicas e com os ajustes nele implementados pelos técnicos da RIOCELL. Nestas curvas, apresentam-se apenas a referência e a variável controlada. A saída do controlador não é indicada nas mesmas, pois não havia possibilidade de armazená-lo, uma vez que a única variável lida pelo sistema de aquisição de dados foi a variável controlada. O período de amostragem utilizado no controle do SDCCD, nas malhas em questão, é de 1s. Para alterar este valor para 100ms (o que permitiria utilizar os parâmetros obtidos pelo ajuste automático no SDCCD), é necessário que a execução do SDCCD seja interrompida. Portanto, a alteração do período de amostragem não foi viável.

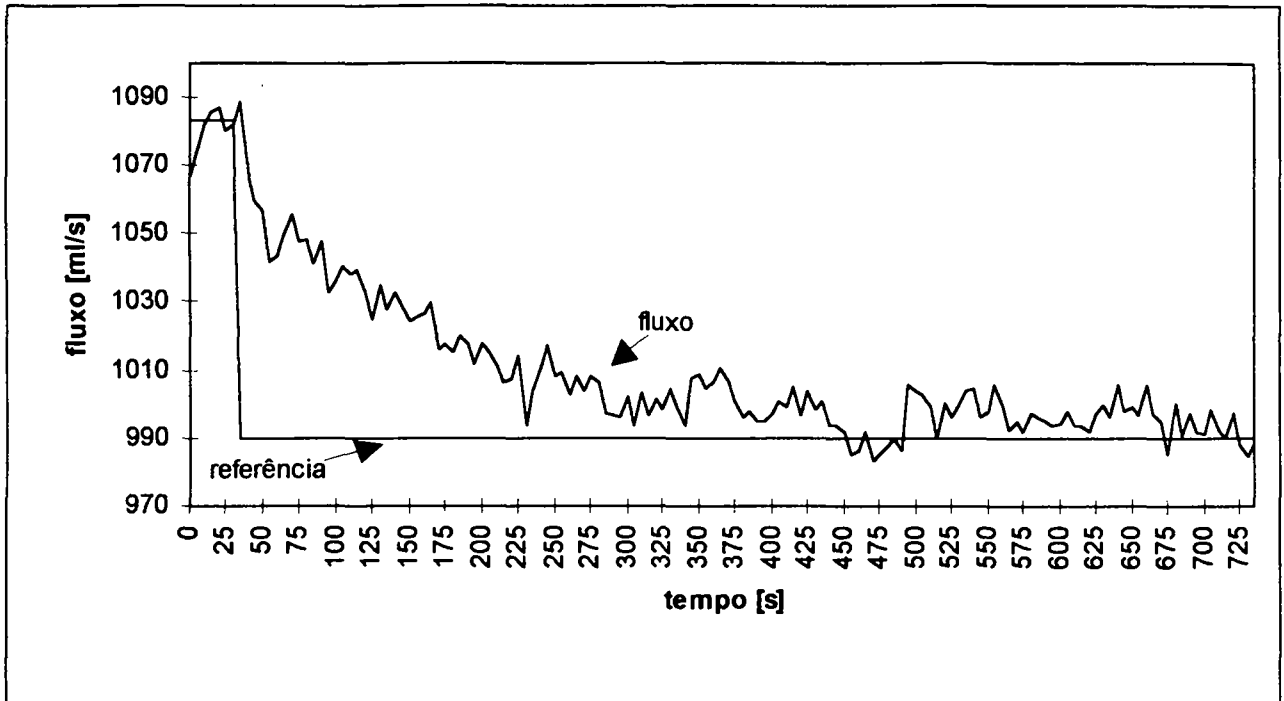
Como critério absoluto de avaliação da velocidade das respostas apresentadas pelos ajustes lento e rápido, será utilizado o *tempo de acomodação* ( $t_a$ ) da resposta, ou seja, o tempo necessário para que a resposta atinja e permaneça dentro de uma faixa em torno da referência, faixa esta que é dada em porcentagem da referência (Kuo, p. 296, 1985; Ogata, p. 265, 1982). Adotar-se-á uma faixa de 5% (um valor menor do que este, em geral, estará dentro da faixa de ruído). Pelas especificações do capítulo 3, os tempos de acomodação (com 5% de faixa) dos ajustes lento e rápido devem ser:

$$\text{Ajuste Lento:} \quad t_a = L + 3\tau \quad (5.1)$$

$$\text{Ajuste Rápido:} \quad t_a = L + 1,5\tau \quad (5.2)$$

### 5.3.1 EXPERIMENTOS NA MALHA 451FICQ-046

A função desta malha é controlar o fluxo de água desmineralizada que é conduzida para um saturador, onde será produzido cloreto de sódio diluído (salmoura) (para maiores detalhes sobre esta malha, bem como as outras, ver anexo2). O primeiro teste foi realizado com o controlador do SDCCD, através de uma mudança de referência entre 1083 ml/s e 990 ml/s, aplicada em  $t=30s$ . Como pode-se verificar pela Figura 37, o tempo de acomodação foi de praticamente 7 min, e a resposta sobreamortecida.



**Figura 37 - Teste com o controle via SDCD em 451FICQ-046.**

Depois, realizou-se um reconhecimento de malha aberta. Os seguintes parâmetros foram encontrados:

$$\text{Reconhecimento: } \left. \begin{array}{l} G = 13,9 \text{ ml / s / \%} \\ L = 0,99s \\ \tau = 1,09s \end{array} \right\} \frac{L}{\tau} = 0,90$$

sendo que os ajustes fornecidos pelo método foram:

$$\text{Ajuste Lento: } \left. \begin{array}{l} K_c = 0,042 \% / \text{ml} / s \\ Ti = 1,35s \end{array} \right\}$$

$$\text{Ajuste Rápido: } \left. \begin{array}{l} K_c = 0,052 \% / \text{ml} / s \\ Ti = 1,44s \end{array} \right\}$$

Como pode-se notar pela constante de tempo e atraso equivalentes do processo, o desempenho apresentado pelo controle do SDCD pode ser bastante melhorado. De fato, com os ajustes lento e rápido, os resultados foram bem melhores, como pode-se ver na Figura 38 e na Figura 39. A mudança de referência, nestes testes, foi aplicada em  $t=1s$ . Observe-se a grande diferença entre a escala de tempo utilizada no gráfico do SDCD (mais de 700s) e as escalas de

tempo para a avaliação dos ajustes (40s), devido à diferença de velocidade entre as respostas apresentadas. Na Figura 38 e na Figura 39, o fluxo está referenciado no eixo vertical da esquerda e o sinal de controle (válvula) no eixo vertical da direita.

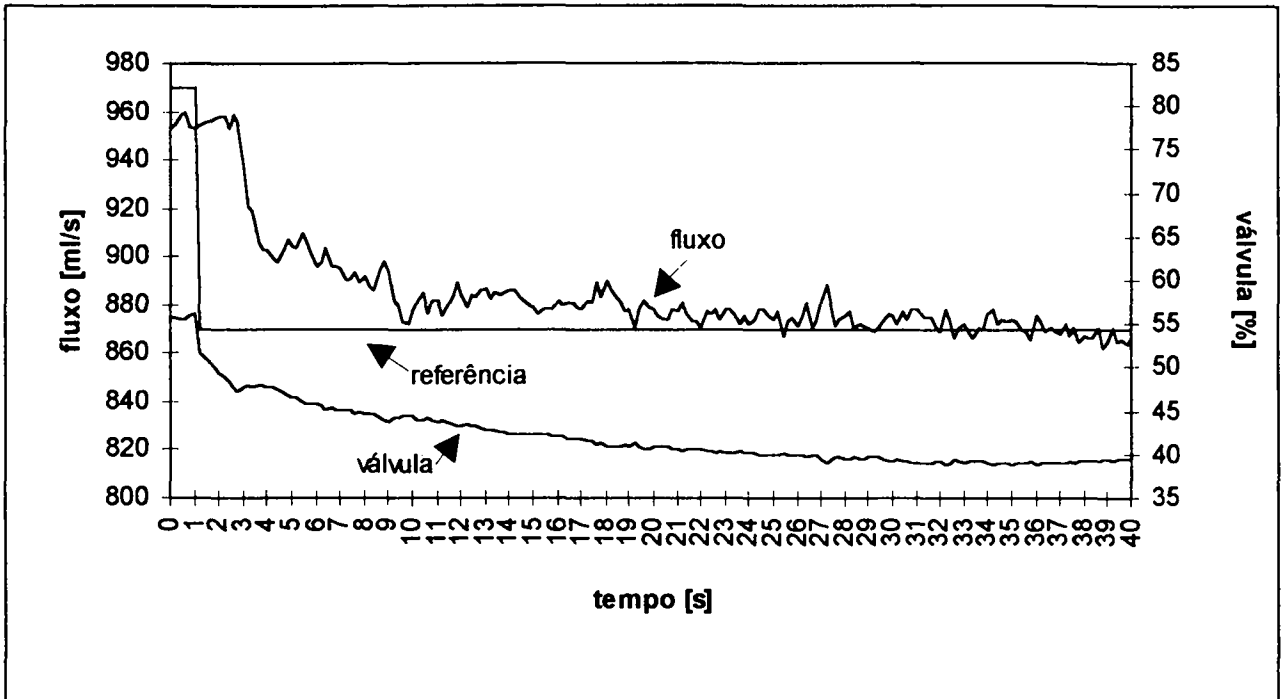
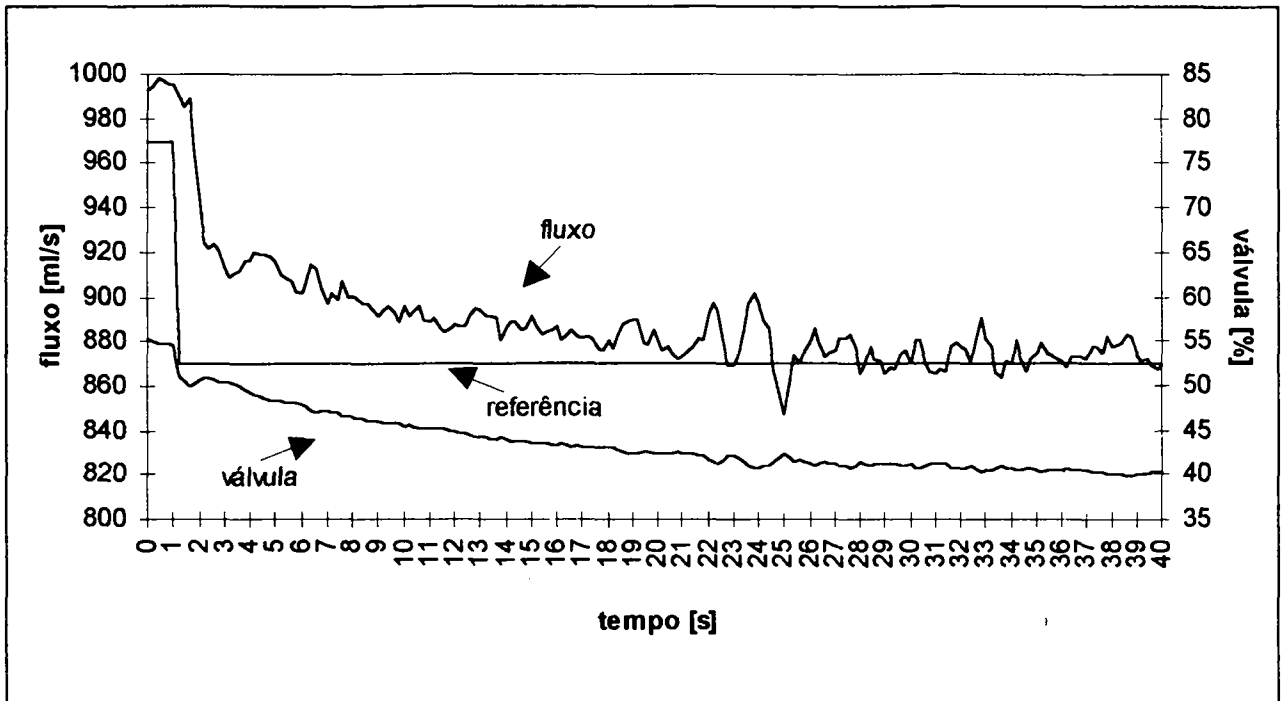


Figura 38 - Ajuste lento em 451FICQ-046 (teste de referência).



**Figura 39 - Ajuste rápido em 451FICQ-046 (teste de referência).**

Note-se que mesmo com o desempenho bem melhor, pois o tempo de resposta diminuiu de alguns minutos para apenas alguns segundos, o controle apresentou variações suaves e pouca trepidação (mesmo com um ruído considerável), característica esta que é interessante para que a vida útil da válvula não seja afetada por um controle inadequado. Isto significa, que para este processo, os ajustes se enquadram dentro das características desejadas em malhas industriais de fluxo.

### 5.3.2 EXPERIMENTOS NA MALHA 451FIC-139

Esta malha controla o fluxo de NaOH até um trocador de calor. O controle via SDCCD, nesta malha, apresenta um ajuste melhor em relação às outras testadas. Na mudança de referência com o controle do SDCCD, aplicada em  $t=5s$ , a resposta apresentou um pouco de sobrepasso (de 20%), como pode ser visto na Figura 40.

O teste de malha aberta, entre 8% e 13% de abertura da válvula, apresentou os seguintes parâmetros:

$$\text{Reconhecimento: } \left. \begin{array}{l} G = 0,12 \text{ ml / s / \%} \\ L = 1,67 \text{ s} \\ \tau = 27,2 \text{ s} \end{array} \right\} \frac{L}{\tau} = 0,06$$

Os ajustes lento e rápido, para este processo, foram:

$$\text{Ajuste Lento: } \left. \begin{array}{l} K_c = 7,17 \% / \text{ml / s} \\ T_i = 26,4 \text{ s} \end{array} \right\}$$

$$\text{Ajuste Rápido: } \left. \begin{array}{l} K_c = 11,98 \% / \text{ml / s} \\ T_i = 26,4 \text{ s} \end{array} \right\}$$

e as curvas dos testes de mudança de referência (aplicada em  $t=5\text{s}$ ), utilizando-se os ajustes lento e rápido, estão na Figura 41 e Figura 42, respectivamente. Novamente o eixo para o fluxo é o da esquerda, e o do controle (válvula) é o da direita. As escalas de tempo para estas figuras é praticamente a metade da escala de tempo da Figura 40.

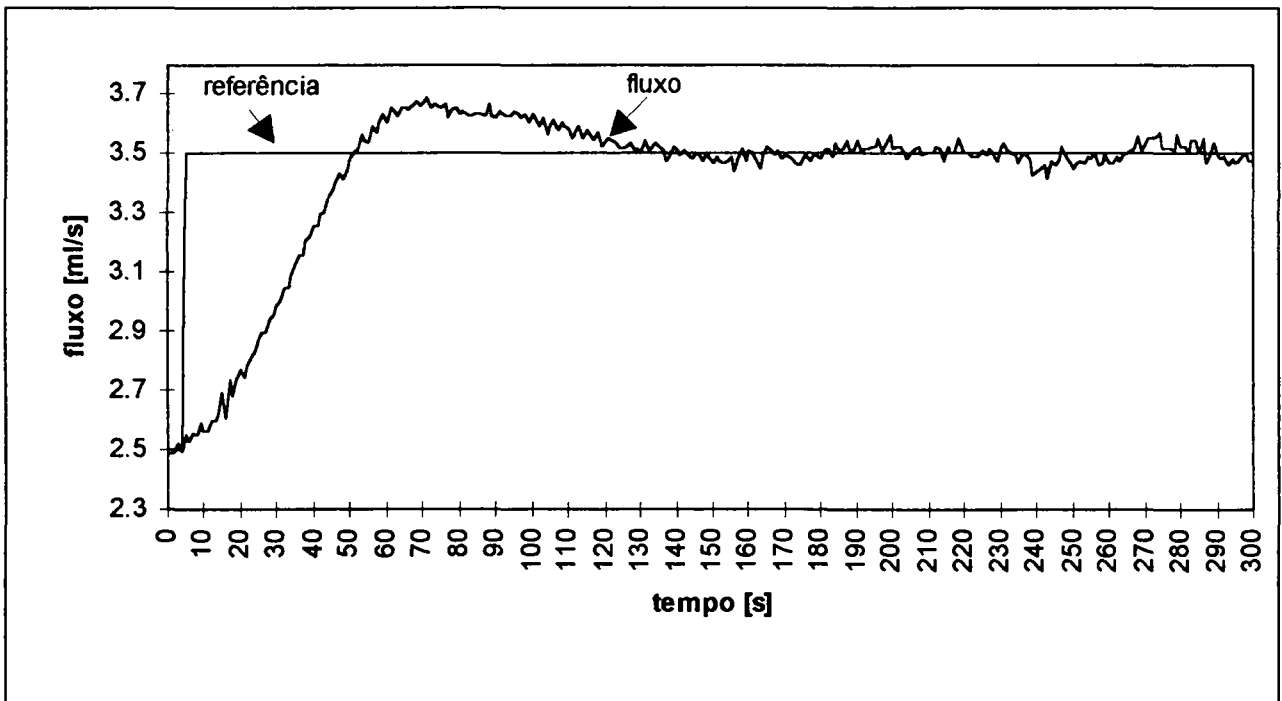
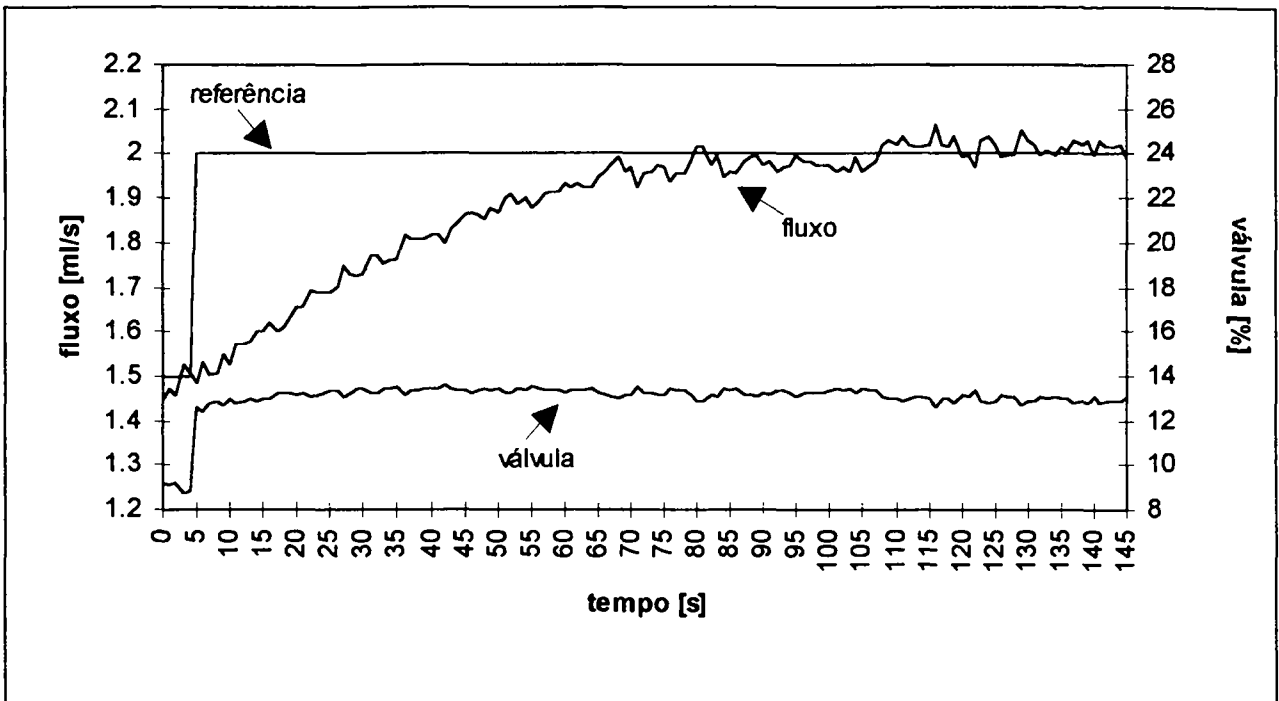
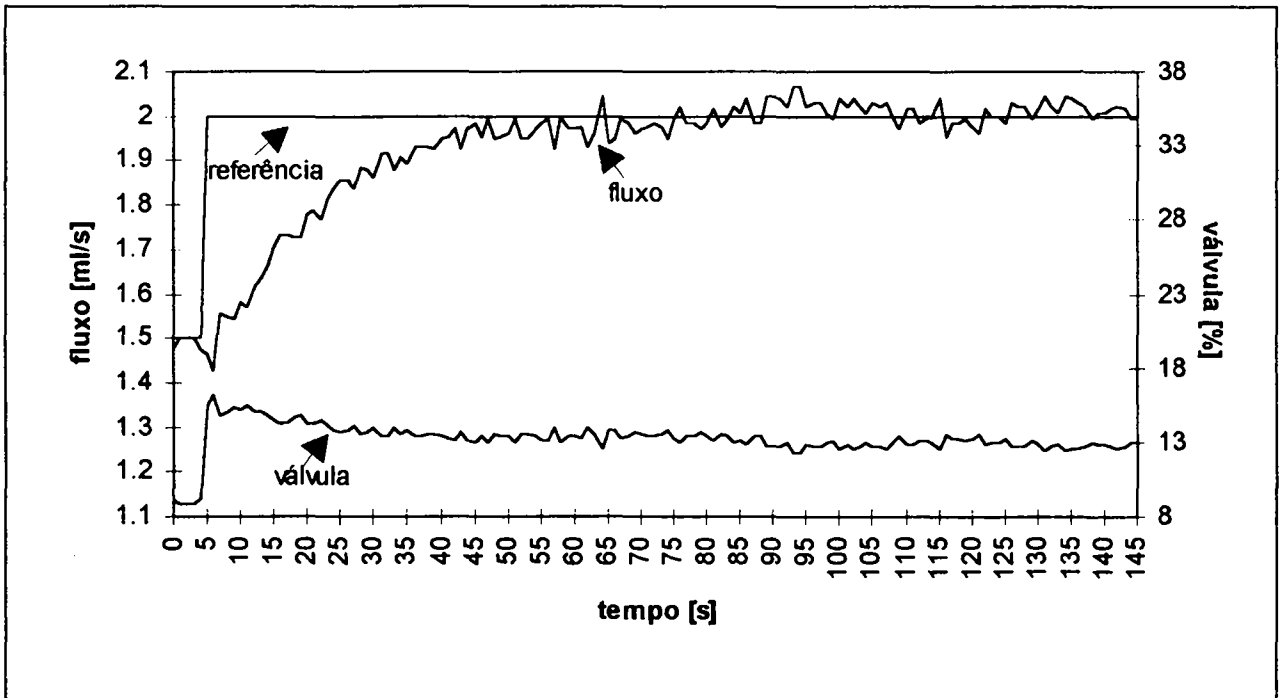


Figura 40 - Teste com o controle via SDCCD em 451FIC-139.





**Figura 41 - Ajuste lento em 451FIC-139 (teste de referência).**



**Figura 42 - Ajuste rápido em 451FIC-139 (teste de referência).**

As respostas aos testes de referência novamente apresentaram respostas sobreamortecidas, conforme a especificação, e tempos de acomodação da ordem de 3 constantes de tempo

equivalente, para o ajuste lento, e 2 constantes para o ajuste rápido, ambos com pouca trepidação da válvula.

### 5.3.3 EXPERIMENTOS NA MALHA 451FICA-172

Esta malha controla o fluxo de água sulfatada (óxido de enxofre). Esta substância é conduzida até um misturador, no qual é misturada com uma solução de salmoura. Nesta malha, a resposta apresentada pelo controle implementado no SDCD (Figura 43), novamente apresentou um desempenho muito aquém daquele que pode ser obtido com um controle adequado. Numa mudança de referência, aplicada em  $t=20s$ , entre 16,5 ml/s e 20,5 ml/s, o tempo de acomodação foi de mais ou menos 7 min. Deve-se esclarecer que neste controle, foi implementada uma técnica conhecida como “*gap control*”, na qual existem duas válvulas (uma maior e outra menor), em paralelo, como elementos finais de controle, atuando simultaneamente. O objetivo é fazer com que a válvula menor realize um ajuste fino em torno da referência, enquanto que a maior é utilizada para conduzir a variável medida até a referência, quando estas variáveis estiverem muito distantes uma da outra.

Por outro lado, como a válvula maior permite trabalhar em toda a faixa de controle do fluxo, que situa-se entre 0 e 100 ml/s, utilizou-se a mesma para a realização dos testes de avaliação das propostas de ajuste, enquanto que a menor permaneceu fechada. Com a malha de fluxo nesta situação, o processo apresentou os seguintes parâmetros na identificação:

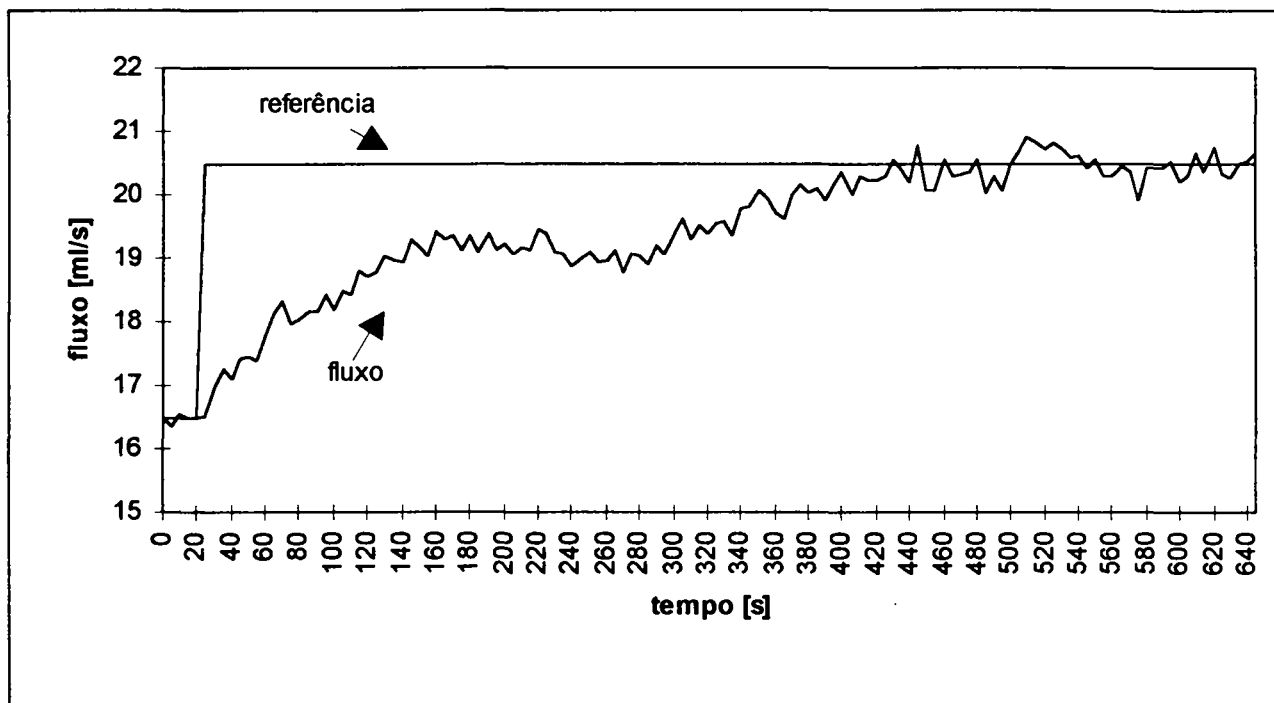
$$\begin{aligned} G &= 0,83 \text{ ml / s / \%} \\ \text{Reconhecimento: } \left. \begin{aligned} L &= 1,76s \\ \tau &= 3,32s \end{aligned} \right\} \frac{L}{\tau} &= 0,53 \end{aligned}$$

Os parâmetros do controlador fornecidos pelo ajuste automático foram

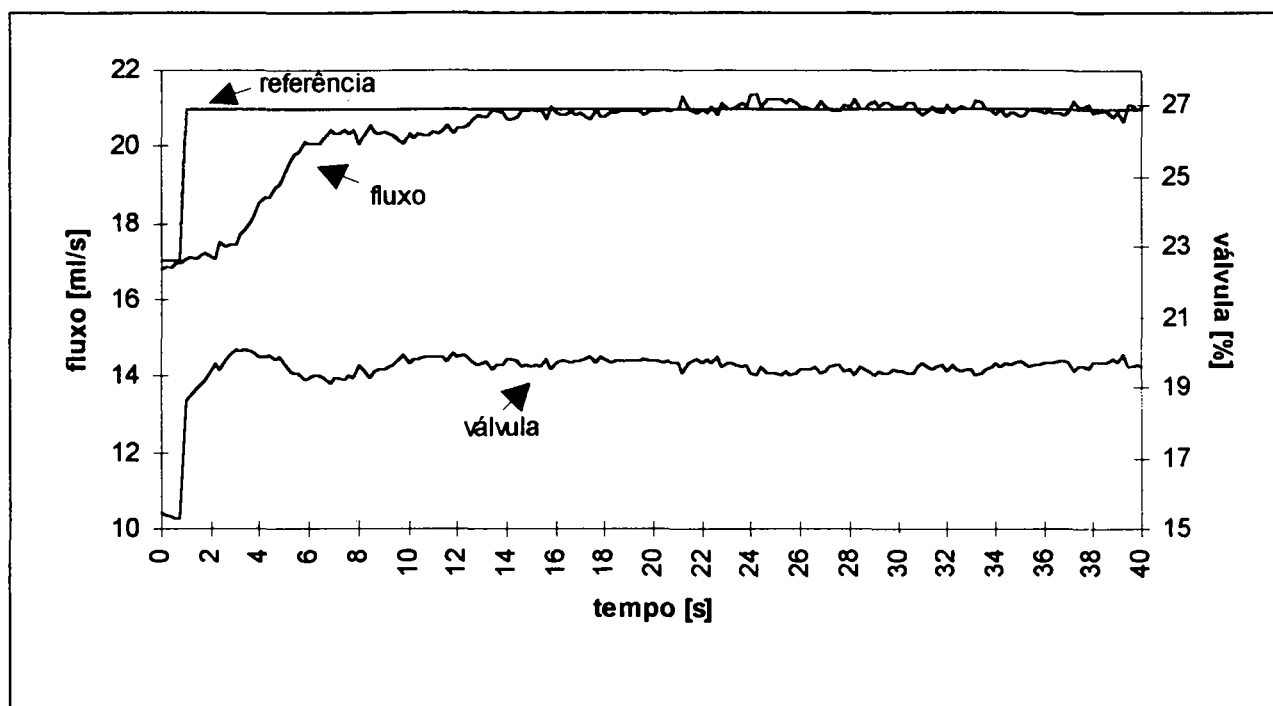
$$\begin{aligned} \text{Ajuste Lento: } \quad K_c &= 0,85 \text{ \% / ml / s} \\ \quad Ti &= 3,71s \\ \text{Ajuste Rápido: } \quad K_c &= 1,25 \text{ \% / ml / s} \\ \quad Ti &= 3,86s \end{aligned}$$

Com estes parâmetros, as curvas resultantes nas mudanças de referência, aplicada em  $t=1s$ , de 17 ml/s para 21 ml/s, estão na Figura 44 e na Figura 45. Estas figuras apresentam o fluxo

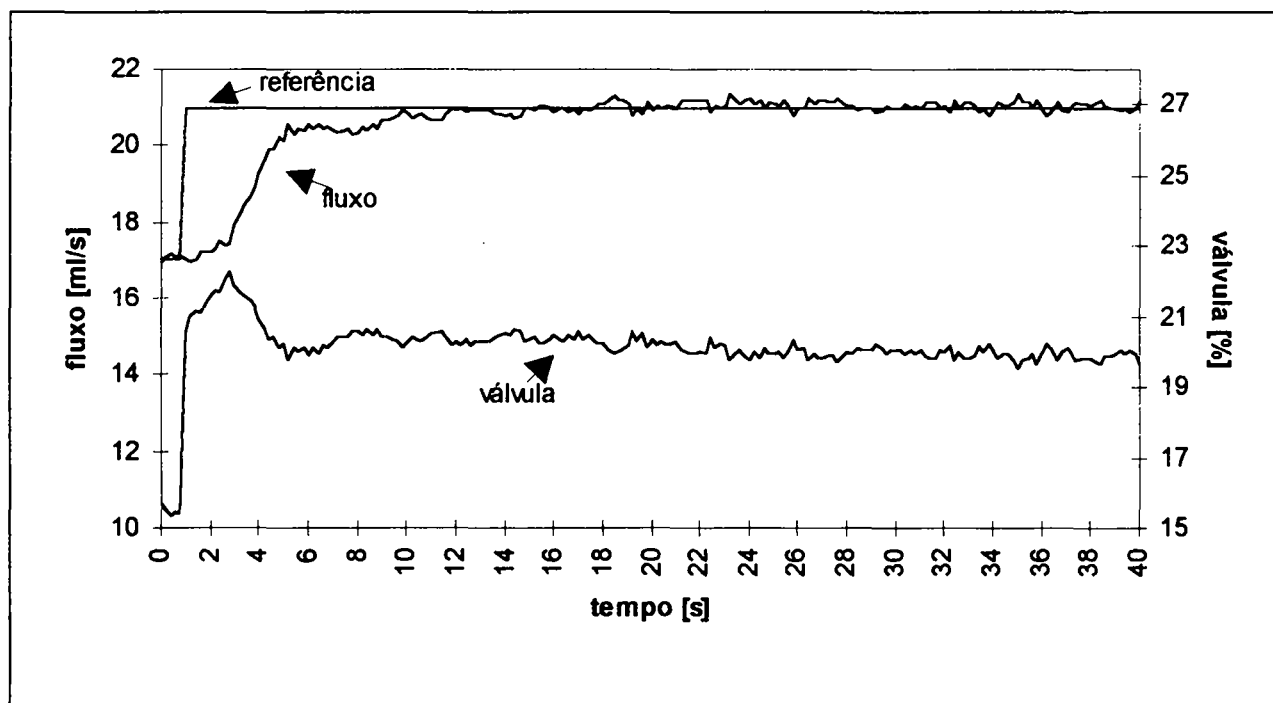
no eixo esquerdo e o controle (válvula) no eixo direito. As escalas de tempo das mesmas (40s), é bem menor do que a escala de tempo da Figura 43, pois a velocidade das respostas dos ajustes automáticos é maior do que a resposta obtida com o controle do SDCCD.



**Figura 43 - Teste com o controle via SDCCD em 451FICA-172.**



**Figura 44 - Ajuste lento em 451FICA-172 (teste de referência).**



**Figura 45 - Ajuste rápido em 451FICA-172 (teste de referência).**

A melhora de desempenho em relação ao obtido pelo controle via SDCD é visível, pois o tempo de estabilização diminuiu para apenas alguns segundos, correspondendo a 3 constantes de

tempo para o caso do ajuste lento e 2 constantes para o ajuste rápido. Segundo informações dos próprios operadores, estava-se estudando uma mudança no controle desta malha para melhorar o seu desempenho, o que pode ser alcançado com um PI, desde que bem ajustado.

Para finalizar esta amostra das avaliações, serão apresentados testes de rejeição de perturbação. As perturbações foram obtidas ao acionar-se uma determinada abertura, de maneira abrupta (do tipo degrau), na válvula menor (em paralelo com a válvula de controle) e depois fechando-a novamente. Assim, cada uma das curvas relativas a estes testes, apresentam 4 picos de desvios do fluxo em relação à referência. O primeiro deles ocorre ao abrir-se a válvula menor em 50% e o segundo ao fechar-se a mesma. O terceiro pico ocorre ao abrir-se a válvula novamente, mas desta vez em 30%, provocando uma perturbação com amplitude menor, e o quarto pico ao fechar-se a válvula menor pela segunda vez. Obviamente, não foi possível realizar este tipo de teste com o controle do SDCD, já que o mesmo utiliza a válvula menor (que foi utilizada para gerar as perturbações) como parte do seu controle.

As curvas com as perturbações estão na Figura 46 e na Figura 47, a primeira correspondente aos testes com o ajuste lento e a segunda com o ajuste rápido. A referência foi mantida sempre constante em 20 ml/s. Os ajustes utilizados são os mesmos apresentados anteriormente para os testes de referência. Observe-se que também nestes gráfico, assim como nos anteriores, os eixos do fluxo e do controle (válvula) não são os mesmos.

A primeira perturbação, por ser mais forte, ocasionou picos mais elevados de desvio do fluxo em relação à referência, e entre os ajustes, os picos foram maiores para o ajuste lento do que para o ajuste rápido, como já era esperado e como havia sido constatado também no processo de laboratório. A recuperação do sinal em direção a referência, após a ocorrência do pico máximo, também ocorreu de uma maneira sobreamortecida, conforme as especificações de desempenho, com uma velocidade até mais rápida do que aquela encontrada para mudanças de referência. Considerando-se o tempo compreendido entre o início do efeito da perturbação na variável medida e a recuperação da mesma até a referência novamente, decorreram-se 25s, ou até um pouco menos, para o ajuste lento (o que corresponde a mais ou menos uma constante de tempo equivalente) e 15s, em média, para o ajuste rápido (correspondendo a meia constante de tempo equivalente do processo).

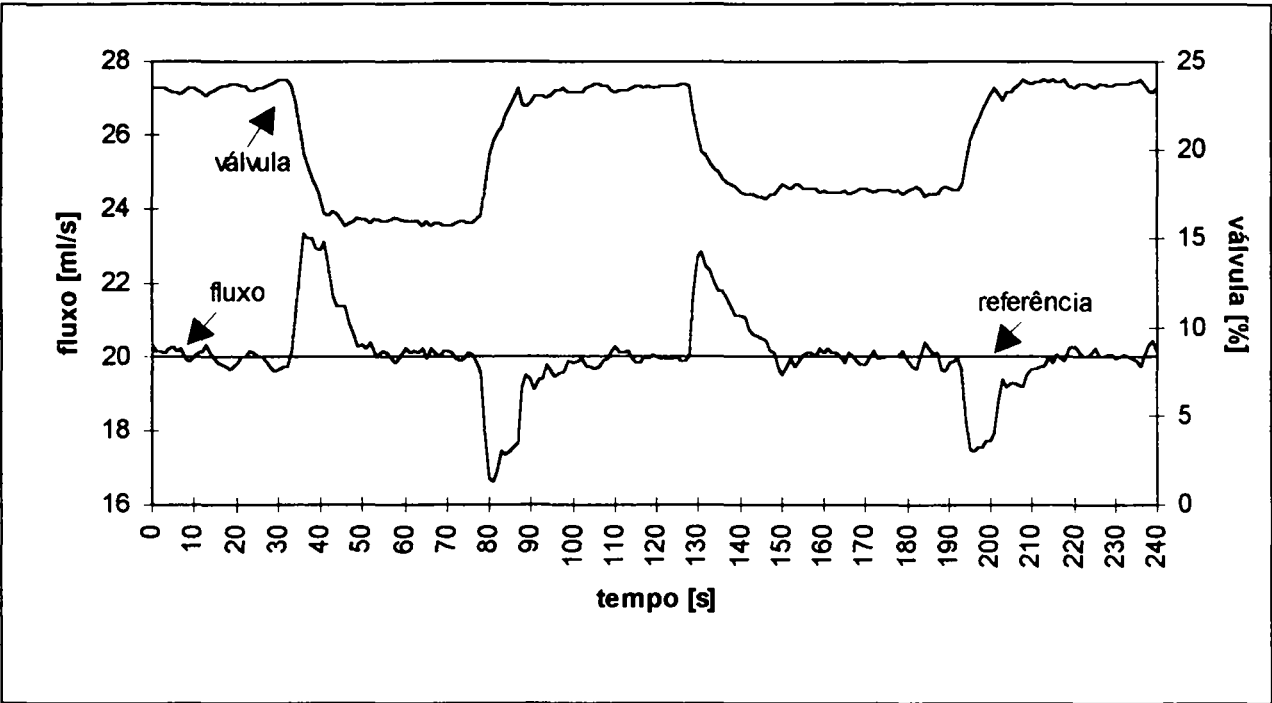


Figura 46 - Ajuste lento em 451FICA-172 (teste de perturbação).

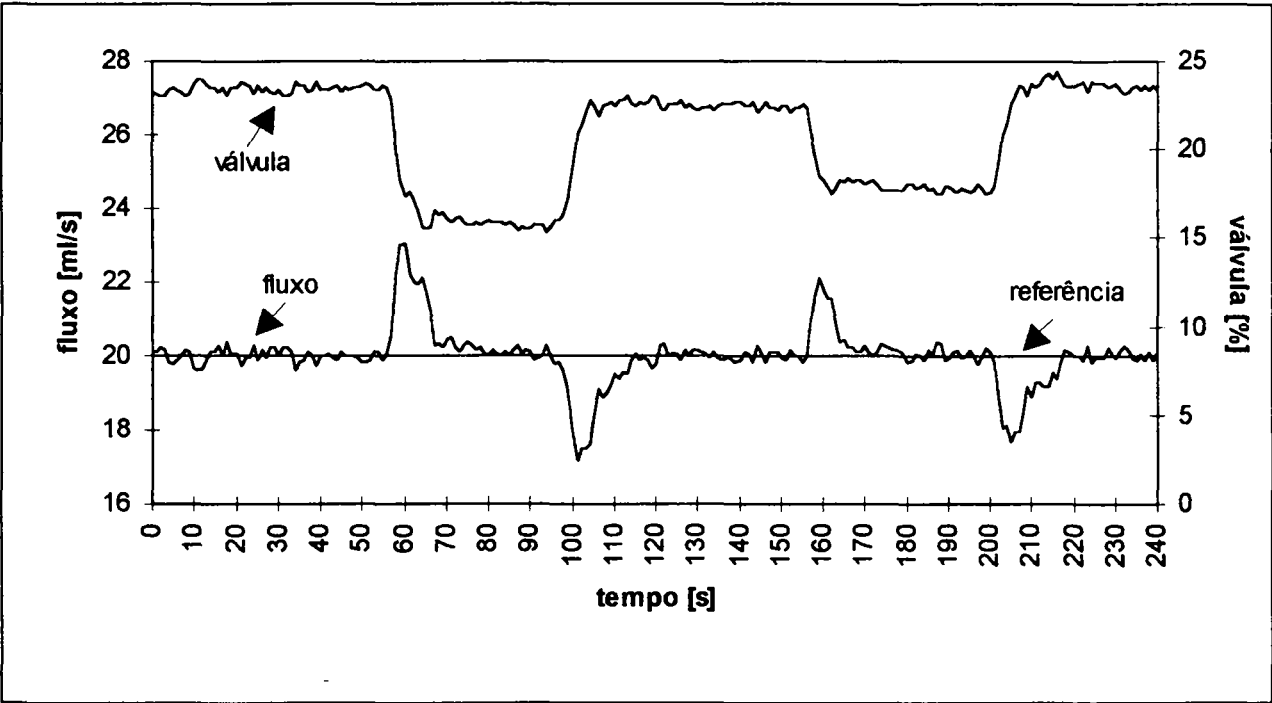


Figura 47 - Ajuste rápido em 451FICA-172 (teste de perturbação).

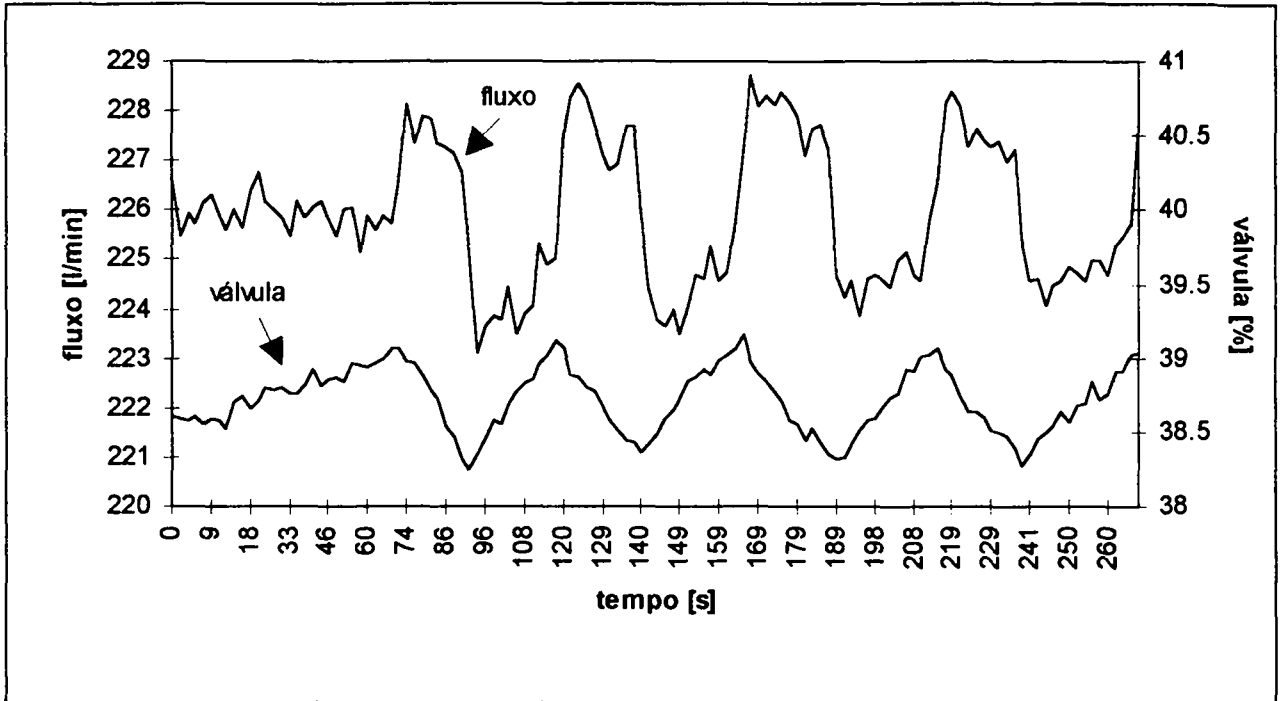
### 5.3.4 PROBLEMAS ENCONTRADOS

Segundo dados fornecidos por Bialkowski (1994) num levantamento realizado no Canadá, em empresas de papel e celulose, 30% das malhas de controle apresentam oscilações causadas pelo comportamento das válvulas. Essas oscilações ocorrem devido à fricção muito elevada nas válvulas, característica abordada na subseção 2.3.4. Esta realidade, parece verificar-se também na RIOCELL, pois de um total de cinco malhas de fluxo selecionadas para a realização de ensaios, duas apresentaram estas oscilações.

Esse problema fica muito bem caracterizado pelo tipo de oscilação que o sinal de controle e a medição apresentam. Na Figura 48, fornecida pelo engenheiro Klas Dahlström, da RIOCELL, mostra-se o gráfico de uma malha (451PIC-018) com este tipo de oscilação. O objetivo desta malha é controlar a diferença de pressão entre uma linha de hidrogênio e outra de cloro, atuando, para tanto, no fluxo de hidrogênio através de uma válvula automática. Existindo um pequeno erro entre a referência e a variável controlada, o controlador (PI) integra-o, aumentando a sua saída quase que linearmente. Devido ao problema de fricção na válvula, o fluxo permanece durante algum tempo praticamente sem responder ao aumento no sinal de controle. Quando este atinge um determinado nível, o fluxo responde muito rapidamente (causado pelo movimento brusco na válvula), passando do ponto onde deveria permanecer e ocasionando a mesma situação descrita, só que no outro sentido. Por isto, este tipo de problema caracteriza-se por um sinal de controle semelhante a uma onda triangular e um fluxo resultante tendendo para uma onda retangular (ou quadrada).

Essa oscilação, originada na própria malha de controle pela característica não-linear da válvula, não pode ser resolvida (e não é ocasionada) pelos ajustes do controlador. A sua solução deve ser obtida através de uma manutenção na válvula de controle (para diminuir o atrito), ou através da utilização de um posicionador adequado (Clair, 1993). Shinskey (citado por Hägglund, 1994) afirma que oscilações, de qualquer natureza, ocasionam os seguintes problemas:

1. aumento no consumo de energia;
2. aumento no consumo de matérias-primas;
3. produtos finais menos uniformes (em alguns casos).



**Figura 48 - Oscilação no processo 451PIC-018.**

Segundo Hägglund (1994), é comum atribuir-se oscilações deste tipo aos ajustes (supostamente errados) do controlador, e por isto, os controladores nestas situações acabam sendo desajustados através de uma diminuição do ganho proporcional ou aumento do tempo integral. Qualquer uma destas atitudes, normalmente apenas provocam um aumento no período de oscilação, conforme a seguinte fórmula, apresentada por Hägglund, para avaliar-se o período de oscilação ( $T_{osc}$ ), causado pela fricção na válvula, em função do ganho proporcional e do tempo integral ( $K_c$  e  $T_i$ ) do controlador:

$$T_{osc} = 2T_i \left( \frac{2}{K_c G} - 1 \right) \quad (5.3)$$

Esta fórmula foi obtida, supondo-se que a variável controlada possui a forma exata de uma onda quadrada, o que constitui-se numa aproximação das condições reais.

Uma das malhas de fluxo que apresentou esse problema, foi a malha 451FICA-036. A identificação deste processo, realizado com um salto de 5% na válvula (de 22% para 27%), resultou em:



$$\begin{aligned} G &= 11,2 \text{ ml / s / \%} \\ \text{Reconhecimento: } \left. \begin{aligned} L &= 0,67s \\ \tau &= 1,18s \end{aligned} \right\} \frac{L}{\tau} &= 0,57 \end{aligned}$$

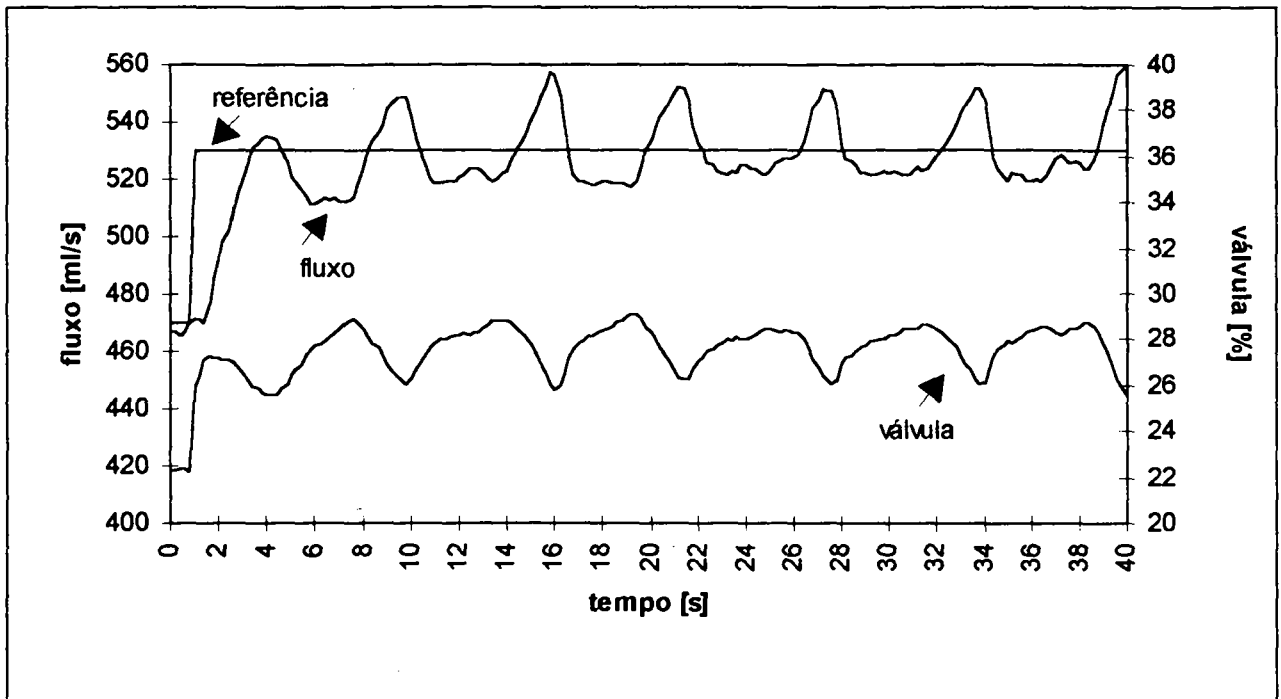
Os ajustes fornecidos pelo método de ajuste automático foram:

$$\begin{aligned} \text{Ajuste Lento: } K_c &= 0,062 \text{ \% / ml / s} \\ Ti &= 1,33s \end{aligned}$$

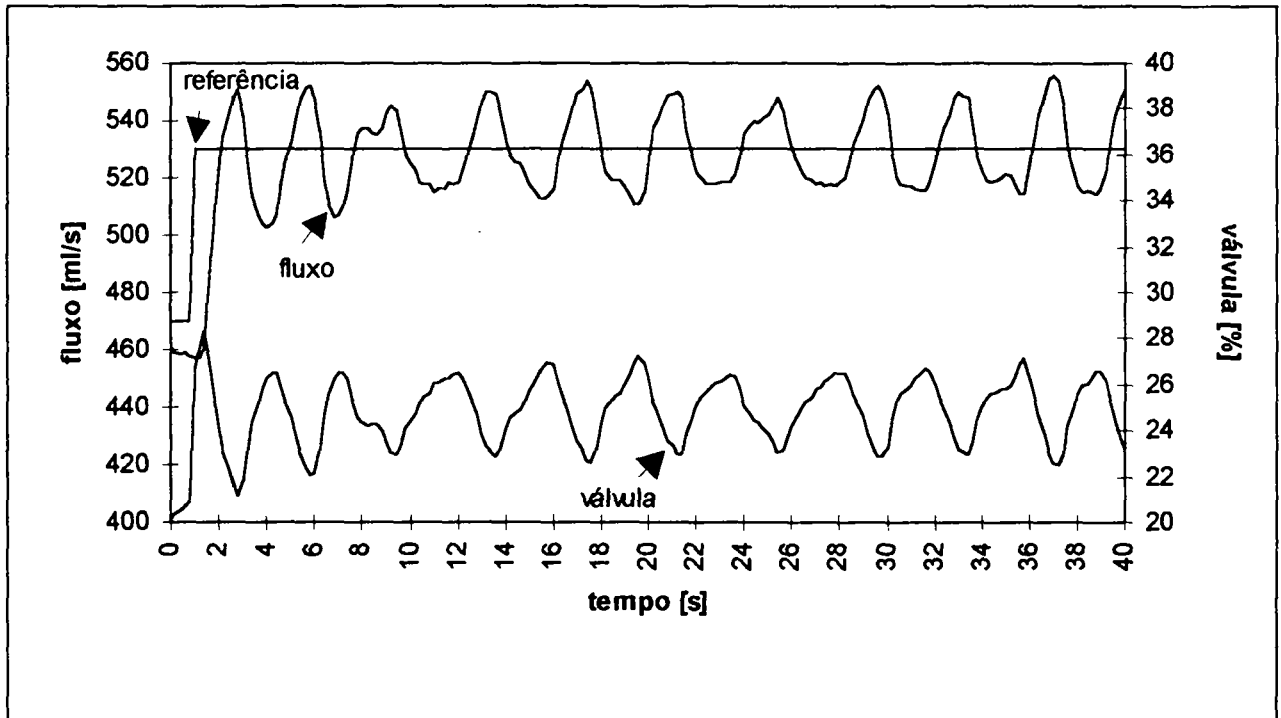
$$\begin{aligned} \text{Ajuste Rápido: } K_c &= 0,090 \text{ \% / ml / s} \\ Ti &= 1,39s \end{aligned}$$

As curvas obtidas com os ajustes lento e rápido apresentaram o mesmo tipo de oscilação. A única diferença é que a oscilação do ajuste lento possuía um período de 6,5s e amplitude pico-a-pico no sinal de controle de 3%, e o ajuste rápido, oscilação com período de 4s e amplitude de 4%. De acordo a fórmula (5.3), o período de oscilação para o ajuste lento seria de 5,0s, e para o ajuste rápido 2,7s. Os valores fornecidos pela fórmula, embora não sejam exatos, servem para estimar o valor real. O fato mais importante, é que a previsão, fornecida pela fórmula, de que o período de oscilação aumenta com ajustes mais fracos foi confirmada. Os gráficos das respostas do ajuste lento e do ajuste rápido para uma mudança de referência em  $t=1s$ , são apresentados na Figura 49 e na Figura 50. O fluxo está referenciado no eixo esquerdo, e o controle (que corresponde à abertura da válvula) no eixo direito.

Uma outra maneira de diagnosticar este problema, além da análise das formas de onda do controle ou do fluxo, é verificar a resposta da válvula a pequenas mudanças no sinal de controle. Isto foi feito nesta malha (Figura 51), com variações de 0,5% no sinal de controle. A conjugação do atrito elevado com a ação do posicionador, causou um sobrepasso muito alto na posição haste da válvula durante uns 10s. Depois disto, a válvula voltou para a sua posição final, que eventualmente foi a mesma posição original, como pode ser notado na mudança de 21,5% para 22% (em 170s na escala do tempo). Observe-se que neste gráfico, o controle está no eixo esquerdo e o fluxo no eixo direito.



**Figura 49 - Ajuste lento no processo 451FICA-036 (com oscilação).**



**Figura 50 - Ajuste rápido no processo 451FICA-036 (com oscilação).**

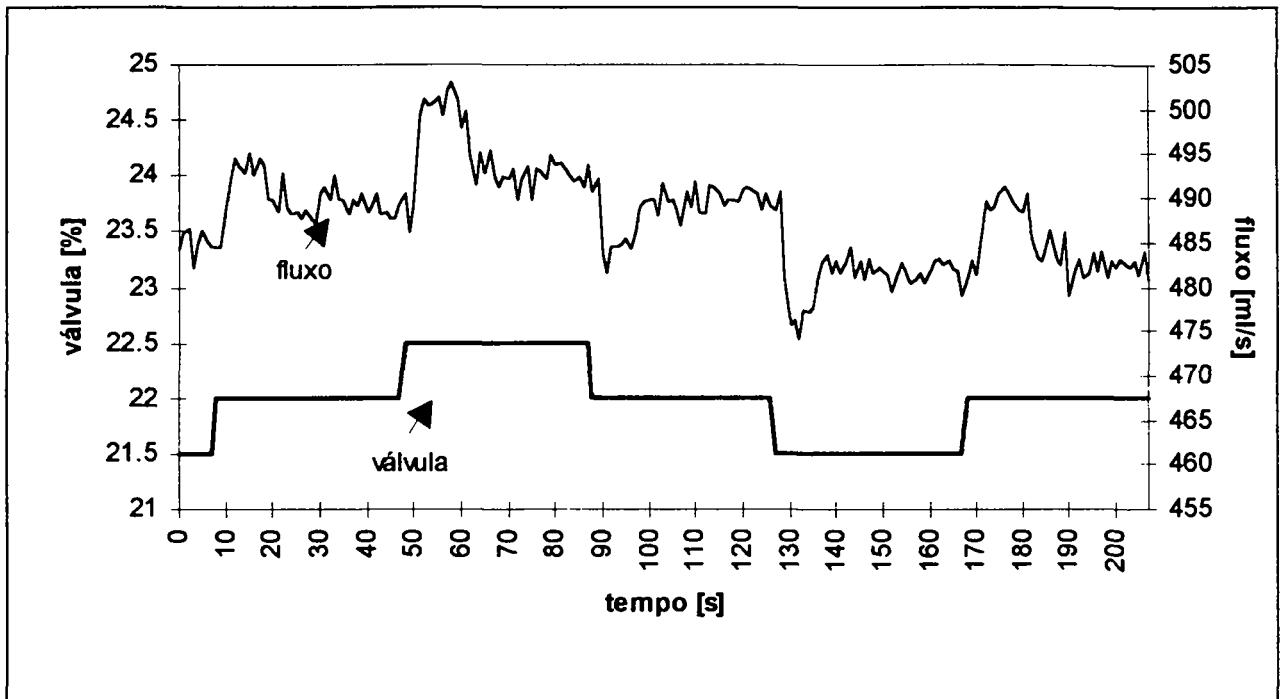


Figura 51 - Testes na válvula da malha 451FICA-036.

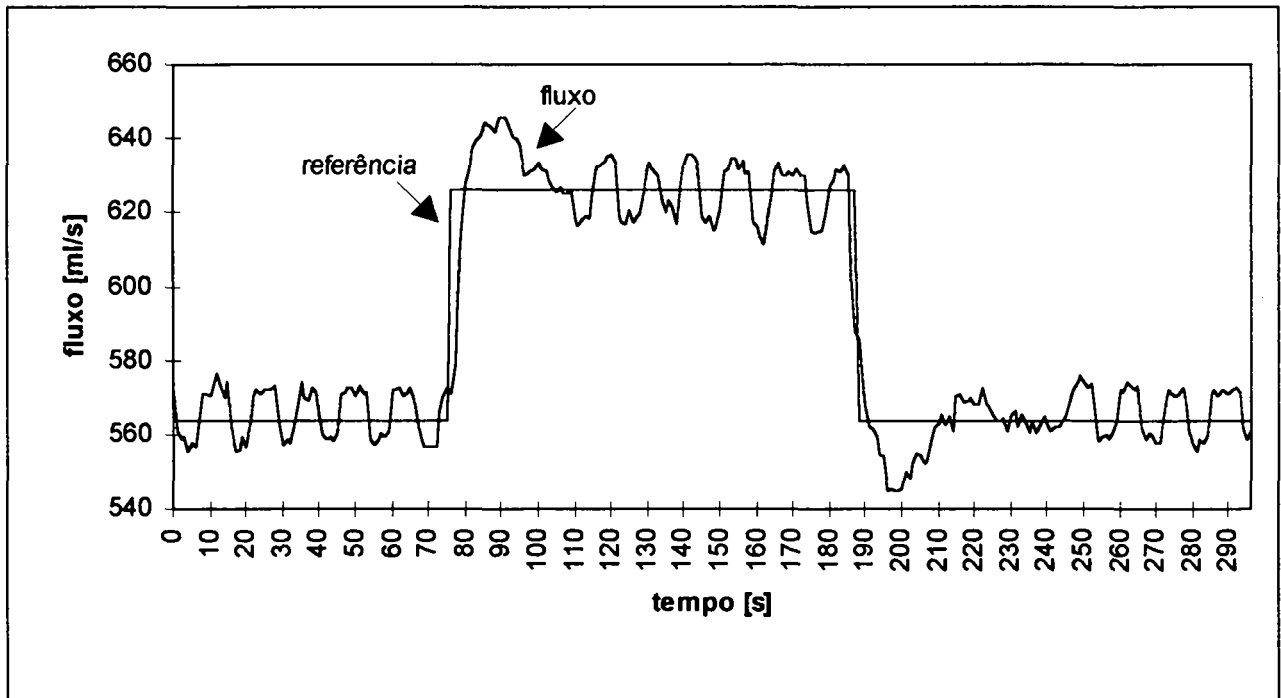


Figura 52 - Controle via SDCD em 451FICA-036 (oscilatório).

Clair (1993, p. 69) afirma que estas oscilações possuem, muitas vezes, uma amplitude pequena e, por isto, passam despercebidas. Na malha 451FICA-036 (cujo transmissor está

calibrado de 0 a 800 ml/s), por exemplo, não foi possível observar uma variação considerável no fluxo, quando analisou-se um gráfico de tendência apresentado nos monitores do SDCCD. Por outro lado, utilizando-se a placa de aquisição de dados (12 bits, usada nos testes), e uma escala apropriada para a variável medida, as oscilações ficaram bastante evidentes, mesmo com o controle via SDCCD, como pode ser visto na Figura 52.

## 5.4 CONCLUSÃO

Foram apresentados neste capítulo diversos resultados, obtidos ao utilizar-se as propostas de ajuste automático (lento e rápido) para sintonizar controladores PI num processo de fluxo de laboratório e em processos reais. Para realizar tal ajuste, o operador necessita apenas definir a amplitude do degrau aplicado na entrada de controle em malha aberta. As respostas obtidas, tanto para mudanças de referência como para rejeição de perturbação foram bastante satisfatórias, pois atingiram os principais objetivos quando da especificação do desempenho para malhas de fluxo, quais sejam:

- respostas sobreamortecidas e
- tempo de resposta semelhante ao tempo da dinâmica de malha aberta do processo.

Outro tipo de avaliação realizada, foi a comparação do desempenho do controle do SDCCD, com o desempenho das propostas de ajuste automático. Constatou-se que não é difícil encontrar tempos de resposta, com o controle do SDCCD, 20 vezes maiores do que os tempos obtidos com os ajustes lento ou rápido, indicando que esta técnica é uma boa ferramenta para auxiliar na sintonia de controladores. As respostas obtidas com o ajuste rápido, eventualmente ocasionaram pequenos sobrepassos nas respostas, mas mesmo esses casos, não se caracterizaram como uma resposta com pouco amortecimento (ou muito oscilatória).

Num procedimento de ajuste, aconselha-se primeiramente a utilizar o ajuste lento. Mais tarde, caso seja verificada uma necessidade de melhora no desempenho do controle, utilizar o ajuste rápido.

Também abordou-se neste capítulo, o problema relativo às oscilações verificadas em duas malhas, causadas por problema de atrito elevado na válvula de controle. Estas oscilações podem, erroneamente, ser atribuídas aos parâmetros do controlador. Por isso, caso alguma malha apresente oscilações, convém analisar-se a própria válvula, ou a forma das ondas oscilatórias (conforme a seção anterior), antes de realizar-se mudanças nos parâmetros do controlador. Esta precaução, vale não apenas para um procedimento manual, mas também para uma possível técnica adaptativa que venha a ser utilizada. Conforme já foi explicado neste capítulo, este problema não pode ser resolvido através de uma mudança nos parâmetros do controlador, mas através de uma melhora no mecanismo de posicionamento da válvula ou de uma manutenção na mesma.

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSÕES

O controle automático é imprescindível para a operação de plantas industriais modernas. Dentre a vasta gama de técnicas de controle existentes atualmente, o controlador PID clássico ainda é o mais utilizado na prática. Contudo, o ajuste manual desses controladores, exige tempo e algum conhecimento (do processo e da teoria de controle). Além do mais, os processos industriais normalmente possuem características não-lineares e variações na sua dinâmica. Por isso, a incorporação de ajuste automático, de planejamento de ganho e de técnicas adaptativas a esses controladores, é de grande interesse.

Este trabalho descreveu um método de ajuste automático de controladores PI para processos de fluxo. À partir de um estudo das características desses processos e da análise, num ambiente industrial, do controle que normalmente é encontrado nessas malhas, constatou-se que ele é equivalente, ou muito mais lento, do que a velocidade obtida em malha aberta. Em função disso, especificou-se um desempenho qualitativo, e depois, quantitativo, optando-se também pela utilização de controladores PI. Para dar maior flexibilidade à proposta de ajuste automático, foram especificados dois desempenhos em malha fechada, que deram origem a dois ajustes automáticos, denominados de lento e rápido.

A obtenção dos ajustes automáticos foi realizada através de simulações, procurando-se minimizar a diferença entre as especificações de desempenho e a resposta de um modelo simplificado (atraso com constante de tempo) para malhas de fluxo. Para a realização da avaliação dos ajustes em processos reais, foi necessário adquirir determinados equipamentos e desenvolver um *software* compatível, que possuíssem determinadas características, conforme foi descrito no capítulo 4. Finalmente, avaliou-se o desempenho apresentado pelo ajuste inicial, através de experimentos realizados em uma unidade experimental de controle de fluxo em laboratório e em algumas malhas pertencentes à planta industrial da empresa RIOCELL. Os resultados permitiram

concluir que os ajustes fornecem respostas próximas das especificações de desempenho, normalmente sobreamortecidas, que era um dos objetivos. Quando as respostas nas malhas industriais, utilizando o ajuste automático, foram comparadas com as respostas apresentadas pelo sistema de controle implementado pelos técnicos da RIOCELL, ficou evidente que o ajuste automático forneceu respostas mais rápidas, sendo que essa diferença, em alguns casos, foi bastante acentuada. Outra questão abordada no capítulo 5, foi a oscilação que pode manifestar-se em malhas de controle, em consequência do atrito em válvulas reguladoras.

Uma característica importante do método de reconhecimento implementado, e por consequência, da proposta de ajuste automático como um todo, é que não se exige, a priori, conhecimento do processo. Para o operador (ou usuário), basta definir qual é a amplitude do degrau a ser aplicado na entrada de controle do processo em malha aberta, e aguardar que o processo atinja o novo valor em regime permanente, após o que, o reconhecimento é encerrado automaticamente.

Um experimento importante, que não foi possível ser realizado, seria colocar os ajustes no próprio sistema de controle da empresa, para avaliar o desempenho e o comportamento dos ajustes por um período longo e contínuo (vários dias). Essa impossibilidade foi causada pelo período de amostragem (1s) utilizado pelo sistema de controle da RIOCELL, enquanto que a velocidade das respostas fornecidas pelos ajustes propostos, exigem a utilização de no mínimo 100ms. A alteração do período de amostragem, embora possível, exige a suspensão da execução de todo o sistema de controle (SDCD). Entretanto, existe uma perspectiva de viabilidade desse tipo de experimento numa unidade da RIOCELL (estação de tratamento da água industrial), cujo sistema de controle está sendo modernizado pela empresa RIOSOFT, numa aplicação direta do projeto TAI (apresentado na introdução).

Como um subproduto deste trabalho, está disponível um sistema portátil de aquisição de dados e controle, que pode ser utilizado em outros trabalhos futuros e na própria continuação do projeto TAI. Ainda dentro deste projeto, está sendo desenvolvido um *software* de aquisição e controle para Windows™ no LCMI, com algumas características incluídas no mesmo, baseadas na experiência adquirida.

Também como consequência deste trabalho, em virtude das oportunidades de contato com a realidade industrial, puderam ser constatados vários problemas e características encontrados em indústrias de processos, relativos às malhas de controle (muitos deles citados por Bialkowski, 1994), a saber:

**Problemas:**

- taxas de amostragem baixas, para alguns casos, em sistemas digitais de controle;
- falta de flexibilidade do sistema de controle;
- ajustes ruins dos parâmetros do controlador;
- número elevado de malhas em manual;
- falta de compensação de atraso de transporte (quando ele for muito elevado)
- faixa muito estreita de parâmetros do controlador;
- oscilações (limitadas em amplitude) em muitas malhas de controle;
- problemas com válvulas de controle (atrito, fluxo muito elevado com a válvula fechada, característica estática alterada, etc.);
- falta de tratamento adequado do ruído e
- falta de conhecimentos básicos sobre a teoria de sistemas dinâmicos e de controle automático, por grande parte dos profissionais que trabalham com controle e automação de processos.

**Características:**

- controle realizado exclusivamente por controladores PID e
- ação derivativa pouco usada por dificuldades de ajuste;



Como perspectiva deste trabalho, para um aprimoramento do controle para processos de fluxo, deve-se verificar a possibilidade de acrescentar a técnica de planejamento de ganho ao controle. O ganho estático nesses processos pode variar muito com o ponto de operação, e a inclusão desta técnica pode fornecer uma compensação adequada para esta variação. Além disso, conforme já foi destacado na introdução deste trabalho, a utilização do planejamento de ganho fica bastante facilitada, quando este é conjugado com o ajuste automático.

Finalizando, resta salientar que dentro do escopo do projeto TAI, serão objetos de estudos e desenvolvimentos semelhantes aos relatados neste trabalho, outros tipos de processos citados na introdução.

## **R E F E R Ê N C I A S**

## **B I B L I O G R Á F I C A S**

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, Annibal Hoeschl. "Implementação de um Controlador PID AutoAjustável Baseado em Reconhecimento de Formas de Onda" (Dissertação de Mestrado). Florianópolis: Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, 1992.
- ASTRÖM, K. J., HÄGGLUND, T., HANG, C. C. & HO, W. K. "Automatic Tuning and Adaptation for PID Controllers - a Survey". Control Eng. Practice, Great Britain, v. 1, n. 4, p. 699-714, 1993.
- ASTRÖM, Karl Johan & HÄGGLUND, Tore. "Automatic Tuning of PID Controllers". North Carolina: ISA (Instruments Society of America), 1988.
- BIALKOWSKI, W. L. "Dynamic Specification: the Answer to the Control Performance Issue". Preprints of Control Systems 94 - Conference on Control Systems in the Pulp and Paper Industry. Stockholm, Sweden. p. 183-189, 1994.
- BRUCIAPAGLIA, A. H. & APÔLONIO, R. "Uma estratégia de Eliminação da Sobrecarga da Ação Integral para Controladores PID discretos: Aplicação no Controle de Velocidade de um Motor de Corrente Contínua". II Congresso Latino-Americano de Automática. Buenos Aires, Argentina, 1986.
- BRUCIAPAGLIA, Augusto Humberto. "Sobre o Desenvolvimento do Controlador PID-AA/UFSC: Nova Proposta para Processos com Atraso de Transporte Dominante". Trabalho escrito e apresentado para fins de Concurso Público de Provas e Títulos para o cargo de Professor Titular da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, novembro, 1992.
- BUCKLEY, Page S. "Techniques of Process Control". Huntigton, New York: R. E. Krieger, 1979. *Original Edition 1964 by J. Wiley & Sons, New York. Reprint Edition 1979 with corrections.*

- 
- CAETANO, Saul Silva. "Controlador PID AutoAjustável: Novos Desenvolvimentos" (Dissertação de Mestrado). Florianópolis: Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, 1992.
- CEAGLSKE, Norman H. "Automatic Process Control for Chemical Engineers". New York: J. Wiley & Sons, 1956.
- CLAIR, David W. St. "Controller Tuning and Control Loop Performance". 2. ed. United States of America: Straight-Line Control Company, 1993.
- COUGHNOWR, Donald R. "Process Systems Analysis and Control". 2. ed. Singapore: McGraw-Hill, 1991.
- COUGHNOWR, Donald R. & KOPPEL, Lowell B. "Process Systems Analysis and Control". Tokyo: McGraw-Hill, 1965.
- DRISKELL, L., "Control-Valve Selection and Sizing". ISA (Instrument Society of America), 1983.
- GOULD, Leonard A. "Chemical Process Control: Theory and Applications". Reading, Massachusetts: Addison-Wesley, 1969.
- HÄGGLUND, T. "A Dead-time Compensating Three Term Controller". 9th IFAC/IFORS Symposium on Identification and System Parameter Estimation, p. 1117-1122, Budapest, Hungria, 1991.
- HÄGGLUND, T. "Automatic Monitoring of Control Loop Performance". Preprints of Control Systems 94 - Conference on Control Systems in the Pulp and Paper Industry. Stockholm, Sweden. p. 190-196, 1994.
- JONES, J. O. "Introduction to Hydraulics and Fluid Mechanics". New York: Harper & Brothers, 1953.

- KAMMER, Leonardo César. "Desenvolvimento de um Ambiente de Simulação para Análise de Desempenho de Controladores Adaptativos" (Dissertação de Mestrado). Florianópolis: Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, 1992.
- KING, H. W., WISLER, C. O. & WOODBURN, J. G. "Hydraulics". John Wiley&Sons, 1948.
- KUO, Benjamin C. "Sistemas de Controle Automático". Traduzido do original "Automatic Control Systems". 4 ed. Rio de Janeiro: Prentice-Hall, 1985.
- LIPTÁK, Béla G. (Editor-in-Chief) & VENCZEL, Kriszta (Associate Editor). "Instrument Engineer's Handbook". Radnor, Pensilvânia: Chilton Book, v. 2, 1985. Edição revisada.
- LUYBEN, William L. "Process Modeling, Simulation and Control for Chemical Engineers". 2. ed. Singapore: McGraw-Hill, 1990.
- MAIA, Maurício Rocha. "Controlador PID-AA: Desenvolvimento de Novas Técnicas de Pré-ajuste e de Compensação de Atraso de Transporte" (Dissertação de Mestrado). Florianópolis: Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, 1993.
- MARTIN, James & McCLURE, Carma. "Técnicas Estruturadas e CASE". Tradução do original "Structured Techniques - The Basis for CASE" por Lúcia Faria Silva. São Paulo: Makron, McGraw-Hill, 1991.
- NISHIKAWA, Yoshikazu, SANNOMIYA, Nobuo, OHTA, Tokuji & TANAKA, Haruki. "A Method for Auto-tuning of PID Control Parameters". Automatica, Great Britain, v. 20, n.3, p. 321-332, 1984.
- NOZAKA, Y. "Trend of New Control Theory Application in Industrial Process Control (Survey)". 12TH World Congress International Federation of Automatic Control. Sydney, Australia. v. 6, p. 51-54, 1993.

- OGATA, Katsuhiko. "Engenharia de Controle Moderno". Traduzido do original "Modern Control Engineering". Rio de Janeiro: Prentice-Hall, 1982.
- OTT, Henry W. "Noise Reduction Techniques in Eletronic Systems". United States of America: John Wiley & Sons, 1976.
- PAGANO, Daniel Juan. "Desenvolvimento de um Controlador Digital PID AutoAjustável Baseado num Sistema Especialista" (Dissertação de Mestrado). Florianópolis: Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, 1989.
- PALADINO, A. D. A. "Um Gerador de Programas para Sistemas de Regras de Produção Visando a Eficiência na Execução" (Dissertação de Mestrado). Florianópolis: Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, 1991.
- PERSSON, Per & ASTRÖM, Karl J. "PID Control Revisited". 12TH World Congress International Federation of Automatic Control. Sydney, Australia. v. 8, p. 241-244, 1993.
- SANI Jr., Aldo. "O Projeto TAI - Tecnologia de Automação Integrada". Apresentado no Workshop SDCD no Futuro: Field Bus e Sistemas Abertos, na empresa RIOCELL. Guaíba, RS, novembro, 1993.
- SEBORG, Dale E., EDGAR, Thomas F. & MELLICHAMP, Duncan A. "Process Dynamics and Control". New York: J. Wiley & Sons, 1989.
- SHINSKEY, F. Greg. "Process Control Systems : Application, Design and Tuning". 3 ed. Singapore: McGraw-Hill, 1988.
- SIGHIERI, Luciano & NISHINARI, Akiyoshi. "Controle Automático de Processos Industriais: Instrumentação". 2. ed. São Paulo: E. Blücher, 1973. 8ª reimpressão.
- SMITH, Carlos A. & CORRIPIO Armando B. "Principles and Practice of Automatic Process Control". Singapore: J. Wiley & Sons, 1985.

STEPHANOPOULOS, George. "Chemical Process Control: An Introduction to Theory and Practice". Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1984.

WEBER, Thomas W. "An Introduction to Process Dynamics and Control". New York: J. Wiley & Sons, 1973.

ZIEGLER, J. G., NICHOLS, N. B. & ROCHESTER, N. Y. "Optimum Settings for Automatic Controllers". Transactions of the ASME, v. 64, n. 8, p. 759-768, november, 1942.

## **A N E X O S**



## **ANEXO 1**

### **EQUAÇÕES ESTÁTICAS PARA FLUIDOS COMPRESSÍVEIS**

## EQUAÇÕES ESTÁTICAS PARA FLUIDOS COMPRESSÍVEIS

A equação fornecida por Gould (1969, p. 135) para o fluxo de um gás compressível através de uma restrição é (para a situação abaixo do fluxo crítico):

$$V_2^2 - V_1^2 = \frac{2\gamma}{\gamma - 1} R_0 T_1 \left[ 1 - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \quad (\text{A.1})$$

onde

- $V_2$  = Velocidade após a restrição;
- $V_1$  = Velocidade antes da restrição;
- $\gamma$  = Relação entre os calores específicos do gás ( $c_p / c_v$ );
- $R_0$  = Constante dos gases;
- $T_1$  = Temperatura absoluta antes da restrição;
- $P_2$  = Pressão absoluta após a restrição;
- $P_1$  = Pressão absoluta antes da restrição.

Para o fluxo de fluidos compressíveis nas válvulas, segundo Smith e Corripio (1985, p. 141-143), a empresa Masoneilan considera as seguintes equações:

### Fluxo volumétrico de gases

$$Q = \frac{836 C_f P_1 (y - 0,148 y^3) C_v}{\sqrt{DT}} \quad (\text{A.2})$$

### Fluxo de massa de gases

$$W = 2,8 C_f P_1 \sqrt{D_f} (y - 0,148 y^3) C_v \quad (\text{A.3})$$

### Fluxo de vapor

$$W = \frac{1,83 C_f P_1 (y - 0,148 y^3) C_v}{(1 + 0,0007 T_{SH})} \quad (\text{A.4})$$

onde

$Q$  = Fluxo [scfh];

$D$  = Relação entre o peso específico do fluido e do ar [adimensional];

$D_f = G(520 / T)$  [adimensional];

$T$  = Temperatura [°R];

$C_v$  = Coeficiente de fluxo da válvula (fornecido pelo fabricante da válvula)  
[U.S.gpm/ $\sqrt{\text{psi}}$ ];

$C_f$  = Fator de fluxo crítico (depende da válvula; varia de 0,6 a 0,95 e é fornecido pela  
Masoneilan através de tabelas) [adimensional];

$P_2$  = Pressão absoluta após a válvula [psia];

$P_1$  = Pressão absoluta antes da válvula [psia];

$\Delta P = P_2 - P_1$  [psia];

$W$  = Fluxo [lb/h];

$T_{SH}$  = Temperatura de superaquecimento [°F].

O termo  $y$  expressa a condição de fluxo crítico ou subcrítico, sendo definida como

$$y = \frac{1,63}{C_f} \sqrt{\frac{\Delta P}{P_1}} \quad (\text{A.5})$$

O valor máximo de  $y$  é 1,5. Essa situação indica que o fluxo crítico foi atingido, e o termo nas equações anteriores torna-se  $y - 0,148y^3 = 1$ , com o fluxo ficando dependente apenas de  $P_1$ .

A equação da empresa Fisher Controls para o fluxo compressível é

$$Q = C_s \sqrt{\frac{520}{DT}} P_1 \text{ sen} \left[ \frac{59,64}{C_1} \sqrt{\frac{\Delta P}{P_1}} \right]_{\text{rad}} \quad (\text{A.6})$$

ou

$$Q = C_s \sqrt{\frac{520}{DT}} P_1 \text{ sen} \left[ \frac{3417}{C_1} \sqrt{\frac{\Delta P}{P_1}} \right]_{\text{graus}} \quad (\text{A.7})$$

onde:

$C_g$  = Coeficiente fornecido pela Fischer Controls, dependente da válvula;

$C_1$  =  $C_g / C_v$ ; possui valor que normalmente varia entre 33 e 38.

Nestas duas últimas equações – (A.6) e (A.7) –, a condição de fluxo crítico é fornecida pelo termo senoidal, e o seu argumento pode assumir o valor máximo de  $\pi / 2$  radianos na equação (A.6), ou  $90^\circ$  na equação (A.7). Nesses casos, a condição de fluxo crítico foi atingida.

Maiores detalhes sobre essas equações e sobre os coeficientes apresentados anteriormente, podem ser encontrados em Smith e Corripio (1985).

## **ANEXO 2**

### **CARACTERÍSTICAS DAS MALHAS INDUSTRIAIS DE FLUXO UTILIZADAS PARA TESTES**

## CARACTERÍSTICAS DAS MALHAS INDUSTRIAIS DE FLUXO UTILIZADAS PARA TESTES

No decorrer deste trabalho, vários experimentos foram realizados em algumas malhas de fluxo da RIOCELL, pertencentes a planta de cloro-soda. A utilização da soda cáustica, ocorre durante o cozimento da madeira, numa das etapas iniciais da fabricação de celulose. Já o cloro, é usado para branquear a celulose, que após o cozimento é marrom. Neste anexo, são descritas as características da instrumentação e a função de quatro malhas utilizadas nos testes. cujas identificações no campo são: 451FICA-036, 451FICQ-046, 451FIC-139 e 451FICA-172.

Devido ao ganho que o sinal lido recebe no SDCCD (que é diferente do ganho do sistema de aquisição e controle utilizado para testes), apresenta-se, entre parênteses, o ganho proporcional que o SDCCD teria, caso fosse utilizado no SDCCD o mesmo ganho, de leitura do sinal, implementado no sistema de aquisição.

### MALHA 451FICA-036

- **Fluido:** água desmineralizada (para misturador de soda, sendo esta mistura utilizada numa eletrólise).
- **Medidor:** placa de orifício (com extração de raiz quadrada via *software*).
- **Válvula:** Masoneilan, igual-porcentagem,  $C_v=3,5$ .
- **Alcance (“range”) do transmissor:** 0-800ml/s.
- **Ação de controle:** direta (a válvula é do tipo ar-para-abrir).
- **Período de Amostragem:** 1s.
- **Parâmetros do controlador:**

$$K_c = 0,2 \% / \% (0,025 \% / \text{ml / s}).$$

$$T_i = 2 \text{ s}.$$

$$T_d = 0.$$

**MALHA 451FICQ-046**

- **Fluido:** água desmineralizada (para saturador, onde será produzida salmoura).
- **Medidor:** placa de orifício (com extração de raiz quadrada via *software*).
- **Válvula:** Masoneilan, válvula globo.
- **Alcance (“range”) do transmissor:** 0-2000ml/s.
- **Ação de controle:** direta (a válvula é do tipo ar-para-abrir).
- **Período de Amostragem:** 1s.
- **Parâmetros do controlador:**

$$K_c = 0,005 \% / \% (0,00025 \% / \text{ml/s}).$$

$$T_i = 5 \text{ s.}$$

$$T_d = 0.$$

**MALHA 451FIC-139**

- **Fluido:** NaOH do trocador de calor do católito.
- **Medidor:** eletromagnético (não é preciso extrair a raiz quadrada).
- **Válvula:** Masoneilan, válvula globo.
- **Alcance (“range”) do transmissor:** 0-25 ml/s.
- **Ação de controle:** direta (a válvulas é do tipo ar-para-abrir).
- **Período de Amostragem:** 1s.
- **Parâmetros do controlador:**

$$K_c = 0,5 \% / \% (2,0 \% / \text{ml/s}).$$

$$T_i = 5 \text{ s.}$$

$$T_d = 0.$$

**MALHA 451FICA-172**

- **Fluido:** água sulfitada (óxido de enxofre) (vai para um misturador estático para ser misturada com uma solução de salmoura decolorada, com a finalidade de reagir com o cloro ativo desta última).
- **Medidor:** eletromagnético (não é preciso extrair a raiz quadrada).
- **Válvula 1:** Masoneilan, válvula globo.
- **Válvula 2:** Masoneilan, válvula globo.
- **Alcance (“range”) do transmissor:** 0-100ml/s.
- **Ação de controle:** direta (as válvulas são do tipo ar-para-abrir).
- **Período de Amostragem:** 1s.
- **Parâmetros do controlador:**

$$K_c = 0,5 \% / \% (0,5 \% / \text{ml/s}).$$

$$T_i = 5 \text{ s.}$$

$$T_d = 0.$$

**Observação:** neste laço de controle é utilizada uma técnica conhecida como “*gap control*”, onde existem duas válvulas como elemento final de controle atuando simultaneamente. O objetivo com isto é deixar que uma válvula faça o ajuste fino (a menor delas), enquanto que a maior leva o processo para próximo do ponto de operação. Para realização dos testes foi escolhida a válvula maior (número 2), pois o fluxo máximo com ela era de quase 100 ml/s, abrangendo quase toda a faixa do transmissor, enquanto que a menor (número 1) liberava no máximo 15 ml/s.

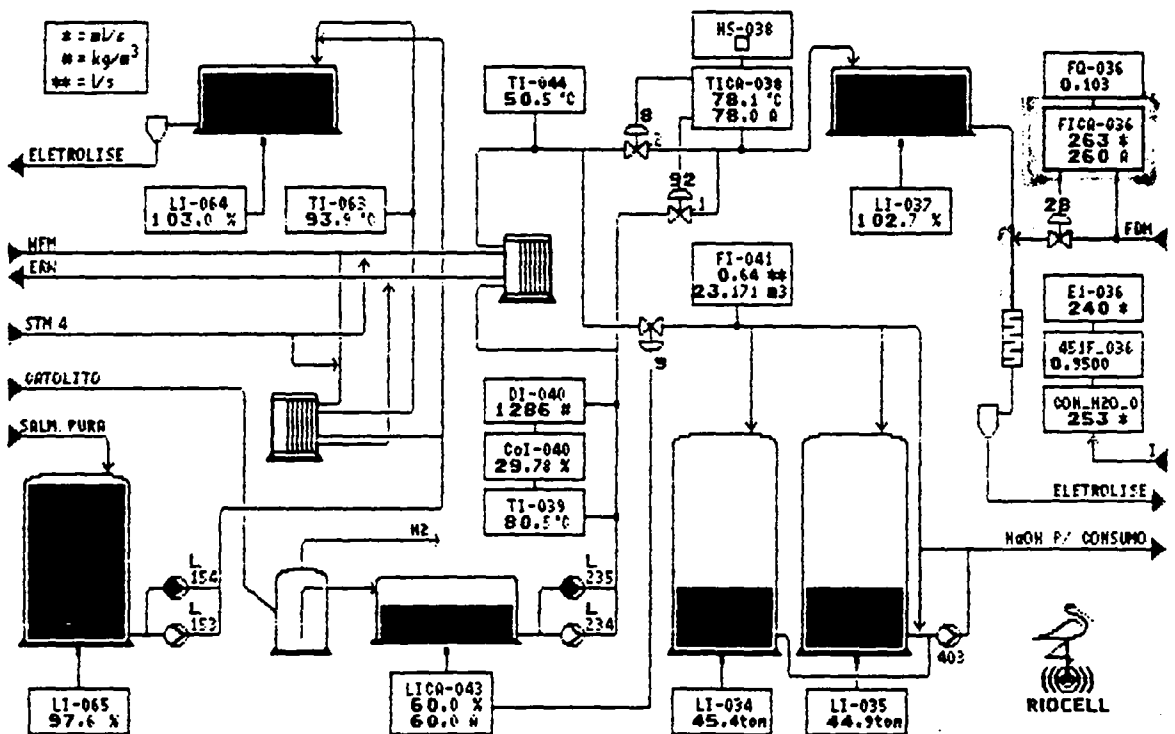
Das páginas seguintes constam as telas do SDCCD, onde encontram-se as malhas apresentadas neste anexo.



# Tela da malha 451FICA-036

PROC.18 SALM./SODA/CATOLITO

1992-07-27 10:28:58

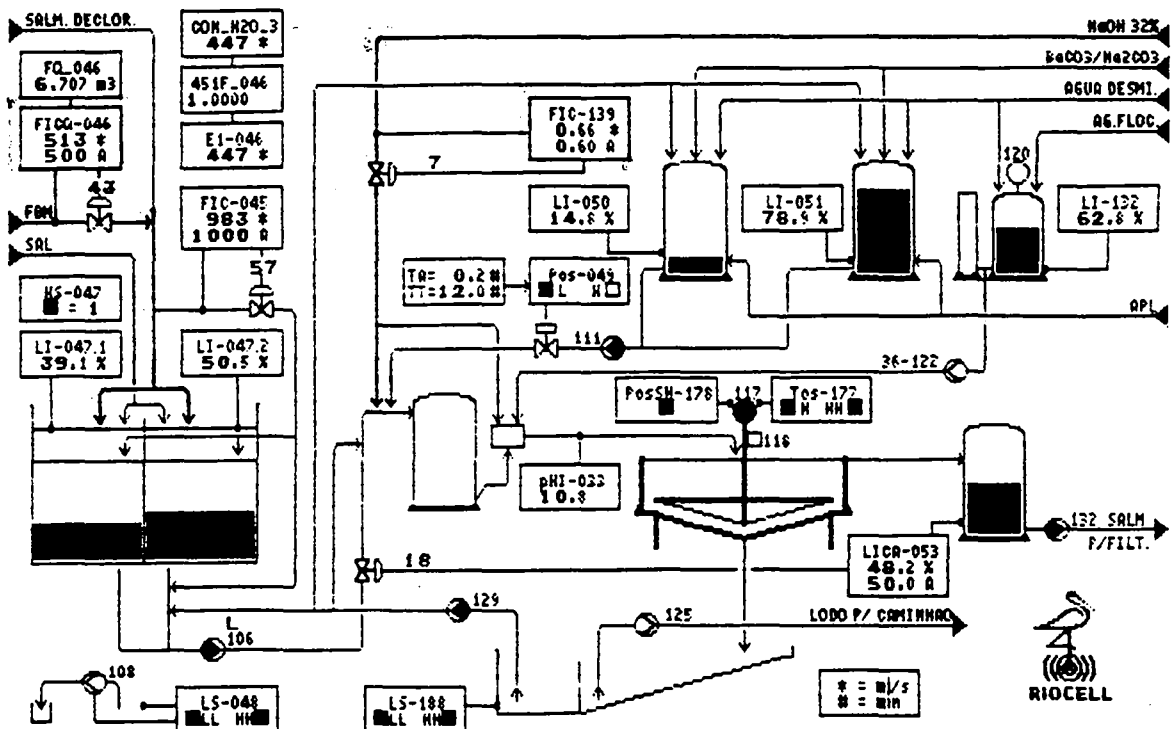


D1 TREND.51	D2 TREND.52	D3 TREND.55	D4	D5
D6	D7	D8	D9 REDUNDANCIA	D10

# Tela das malhas 451FICQ-046 e 451FIC-139

PROC.15 SAT./TRAT. SALMOURA

1992-07-27 10:22:56

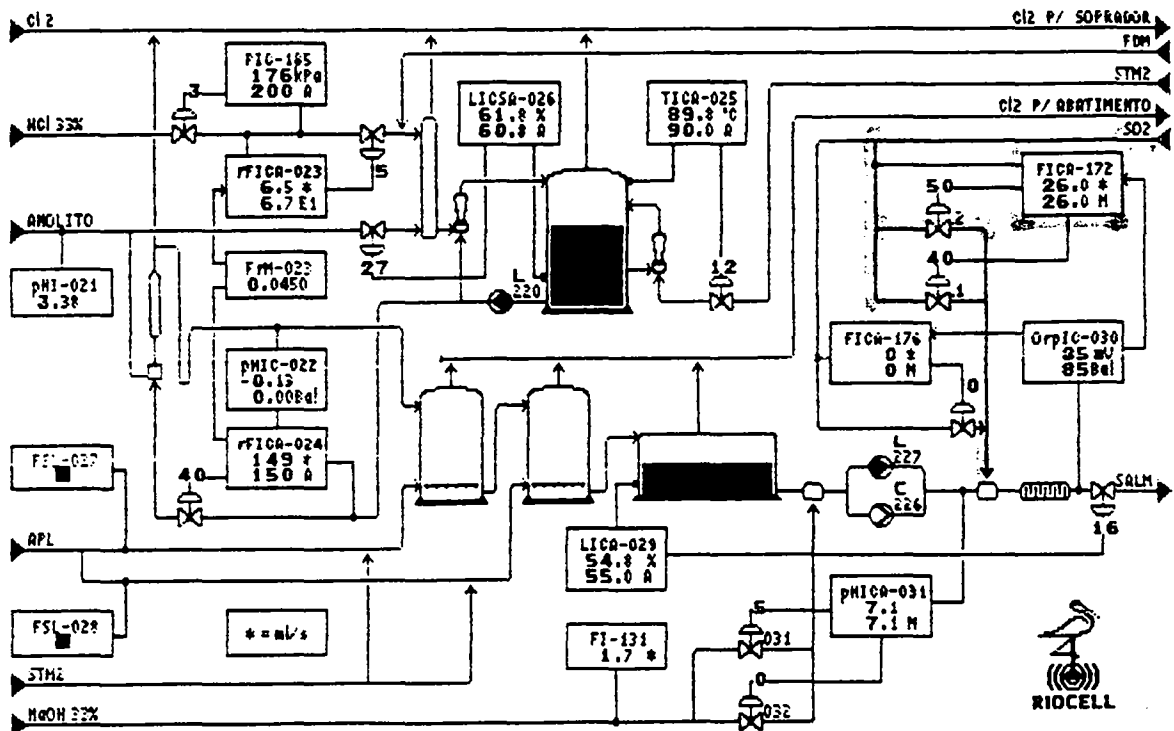


D1 TREND.41	D2 TREND.42	D3 TREND.45	D4	D5
D6	D7	D8	D9 REDUNDANCIA	D10

# Tela da malha 451FICA-172

PROC.19 DESTR. ClO3/DECLOR.

1992-07-27 10:30:29

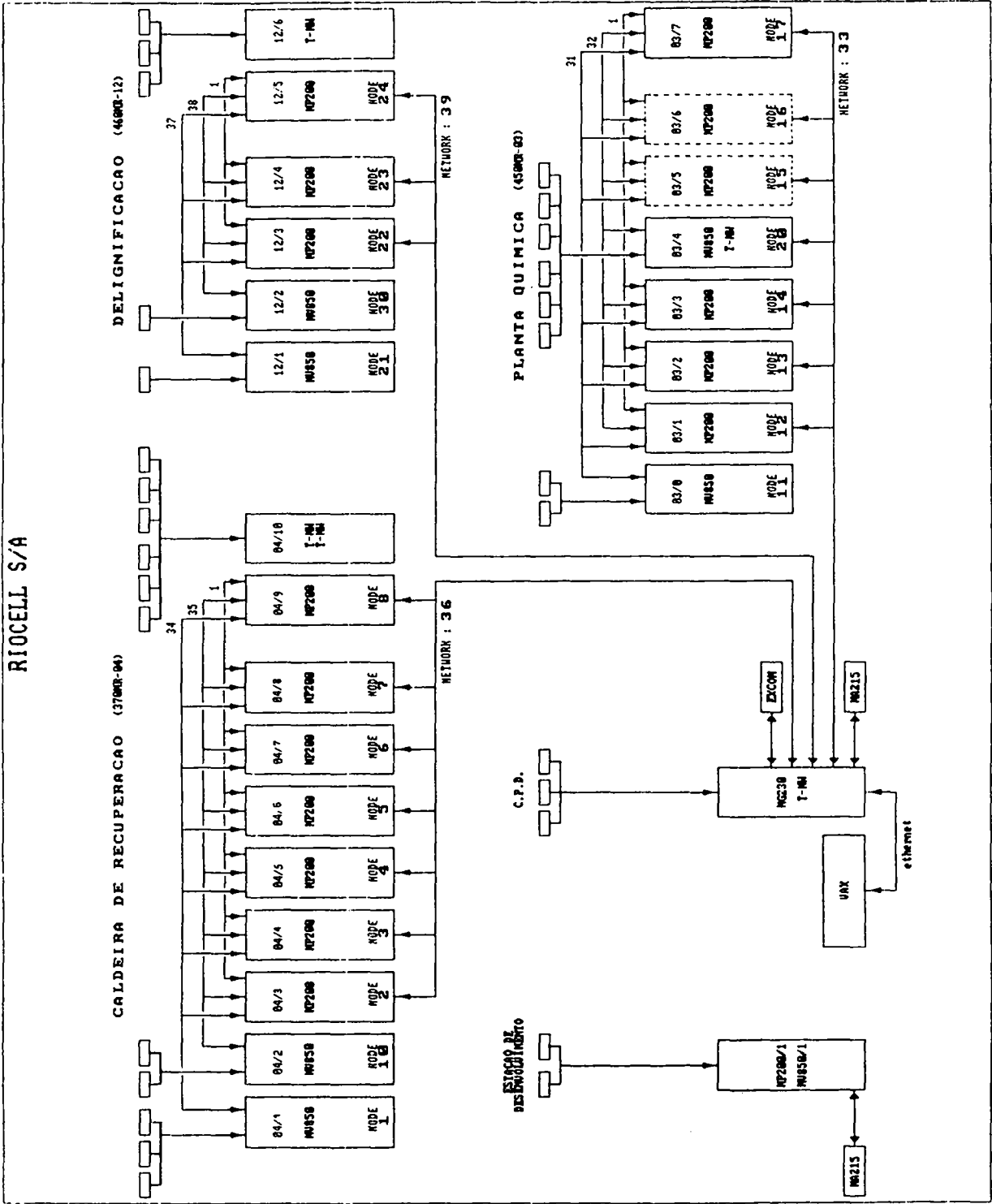


D1 TREND.56	D2 TREND.57	D3	D4	D5
D6	D7	D8	D9 REDUNDANCIA	D10

## **ANEXO 3**

### **DIAGRAMA COM OS SD CD DA RIOCELL**

DIAGRAMA COM OS SDCD DA RIOCELL



## **ANEXO 4**

### **ALGORITMO PID IMPLEMENTADO**

## ALGORITMO PID IMPLEMENTADO

A lei de controle implementada neste trabalho é dada por:

$$u(k) = u(k-1) + K_1 e(k) + K_2 e(k-1) + K_3 e(k-2) \quad (D.1)$$

onde :  $u(k)$  = sinal de controle aplicado;

$e(k) = y_r(k) - y(k)$  (sinal de erro);

$y_r$  = valor de referência;

$y$  = valor medido;

$$K_1 = K_c \left( 1 + \frac{T_d}{T_{amos}} + \frac{T_{amos}}{2T_i} \right) \quad (D.2)$$

$$K_2 = -K_c \left( 1 - \frac{2T_d}{T_{amos}} + \frac{T_{amos}}{2T_i} \right) \quad (D.3)$$

$$K_3 = K_c \frac{T_d}{T_{amos}} \quad (D.4)$$

$K_c$  = ganho proporcional;

$T_d$  = tempo derivativo;

$T_i$  = tempo integrativo;

$T_{amos}$  = período de amostragem.

Esta equação foi obtida a partir do PID clássico contínuo, substituindo-se a ação derivativa por uma equação de diferença de primeira ordem e a ação integral por uma soma aproximada (método trapezoidal). Para contornar o problema da saturação da ação integral, foi incorporada ao algoritmo implementado uma estratégia de eliminação da sobrecarga da ação integral por atualização de variáveis (Bruciapaglia & Apolônio, 1986).